



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsanduse ja maaehituse instituut
Maaehituse ja veemajanduse õppetool

Kert Kartau

KROODI OJA JÄÄKREOSTUSE OHUTUSTAMINE
REMEDIATION OF THE POLLUTED KROODI STREAM

Magistritöö
Vesiehituse ja veekaitse õppekava

Juhendaja(d): lektor Urmas Uri
Erki Kõnd

Tartu 2018

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Kert Kartau		Õppekava: Vesiehitus ja veekaitse	
Pealkiri: Kroodi oja jääkreostuse ohutustamine			
Lehekülgi: 56	Jooniseid: 16	Tabeleid: 4	Lisasid: 1
Õppetool:		Maaehituse ja Veemajanduse	
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood:		Tehnikateadused T270	
Juhendaja(d):		Urmas Uri, Erki Kõnd	
Kaitsmiskoht ja -aasta:		Tartu 2018	
<p>Kroodi oja peetakse üheks Eesti reostunumaks veekoguks. Euroopa Liidu veepoliitika raamdirektiivist tulenevalt peavad kõik veekogumid vastama seisundile “hea”.</p> <p>Magistritöö üheks eesmärgiks on erinevate raskmetallide poolt põhjustatud reostuse ohutamise viiside kirjeldamine. Teiseks eesmärgiks on töödelda Kroodi oja kohta kogutud andmeid ja uurida, kas kohapeal kasvav harilik pilliroog (<i>phragmites australis</i>) omastab arseeni ja tsinki ning võib seeläbi osutada inimeste ja loomade tervisele ohtlikuks. Lisaks kirjeldatakse käesoleval ajal sobivaimat ohutustamise võimalust.</p> <p>Magistritöös on kasutatud varasemalt koostatud reostusuuringu ja käesoleva magistritöö raames analüüsitud tulemusi.</p> <p>Graafilisest analüüsist selgus, et Kroodi oja orus on kaks reostuskollet ning reostus on osaliselt kandunud allavoolu. Katse tulemusest nähtub, et harilik pilliroog (<i>phragmites australis</i>) seob arseeni ja tsinki ning seega on ohtlik nii loomadele kui ka inimestele. Hariliku pilliroo arseeni ja tsingi akumulereimisvõime täpsemaks hindamiseks võiks teha uuringu, mille käigus võetakse Kroodi oja kaldalt erineva arseeni ja tsingi sisaldusega pinnast ning istutatakse sellesse pinnasesse pillirootaimed. Taimedest saab sel viisil võtta proovid nii risoomist, vartest kui ka lehtedest.</p>			
Märksõnad: Harilik pilliroog (<i>phragmites australis</i>), pinnasepesu, vitrifikatsioon, fütoremediatsioon, reostuse isoleerimine			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's thesis	
Author: Kert Kartau		Curriculum: Hydraulic Engineering and Water Pollution Control	
Title: Remediation of the polluted Kroodi stream			
Pages: 56	Figures: 16	Tables: 4	Appendixes: 1
Chair:		Rural Building and Water Managment	
Field of research and (CERC S) code		Technological sciences T270	
Supervisors:		Urmas Uri, Erki Kõnd	
Place and date:		Tartu 2018	
<p>Kroodi stream is considered to be one of the most polluted streams in Estonia. Due to the directive 2000/60/EC of the European Parliament all member states should aim to achieve the objective of at least good water status.</p> <p>One purpose of this masters thesis is to process the gathered data about Kroodi stream, bring out different ways to remediate the pollution of heavy metals and to describe the best remediation way at the time given. Another purpose is to investigate if the common reed (<i>phragmites australis</i>) growing on site assimilates As or Zn and if through that it could be dangerous to the health of people and animals. In this thesis a previous pollution research and results under investigation in this present case are used.</p> <p>From the graphic analysis appeared that there are two pollution resources in the valley of Kroodi stream and the pollution has partially carried over to downstream. The results of experiments show that the common reed (<i>phragmites australis</i>) assimilates As and Zn and therefore is dangerous to both animals and human. To assess the accumulating ability of the thach more accurately a case study should be done in which soil from different places with different content of AS and Zn should be taken from the shore of Kroodi stream and thach plants should be planted into it. That way samples can be taken from rootstocks, scapes and leaves.</p>			
Keywords: Common reed (<i>phragmites australis</i>), soil washing, vitrification, phytoremediation, soil isolation			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	6
1. KROODI OJA	8
2. REOSTUS JA SELLE TEKKEPÕHJUSED	10
2.1. Ajalugu	10
2.2. Arseen (As).....	13
2.3. Arseni leostumine	14
3. OHUTUSTAMISE VÕIMALUSED.....	15
3.1. Vitrifikatsioon.....	15
3.2. Pinnasepesu	16
3.2.1. In situ pinnasepesu	17
3.2.2. Ex situ pinnasepesu	18
3.3. Pinnase elektrokineetiline tervendamine	19
3.4. Fütoemediatsioon	22
3.4.1. Fütoekstraktsioon	22
3.4.2. Fütofiltratsioon	23
3.4.3. Fütolendumine	23
3.4.4. Fütostabilisatsioon	23
3.4.5. Risodegradatsioon	24
3.4.6. Fütodegradatsioon	24
3.4.7. Fütokaevandamine.....	25
3.5. Bioloogiline tervendamine	25
3.6. Reostuse isoleerimine	26
3.7. Prügilasse ladestamine.....	27
4. UURINGUD	28
4.1. Varasemad uuringud.....	28
4.2. Varasemate uuringute andmete töötlus.....	34
4.3. Reostusandmete graafiline analüüs	35

4.4. As ja Zn omastamine hariliku pilliroo poolt.....	43
4.5. Keemiliste elementide sisalduse uuring	45
4.5.1. ICP-MS meetod	48
5. VALITUKS OSUTUNUD OHUTUSTAMISE VIIS	49
KOKKUVÕTE	50
KASUTATUD KIRJANDUS	51
LISAD	53
Lisa 1. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta.....	54
GRAAFILISED LISAD	
1. Reostusväärtuste visualiseering	
2. Ristlõige nr 1	
3. Ristlõige nr 2	
4. Ristlõige nr 3	
5. Ristlõige nr 4	
6. Ristlõige nr 5	

SISSEJUHATUS

Harjumaal Maardu linnas asub Kroodi oja, mis saab alguse Maardu järve põhjakaldalt ning voolab läbi Maardu linna ja suubub Muuga lahte. Kroodi oja peetakse üheks Eesti reostunumaks veekoguks. Ajalooliselt on oja kvaliteeti kõige rohkem mõjutanud fosforiidi kaevandamine ja rikastamine. Oja reostuskoormus oli suurim fosforiidi kaevandamise ajal, mil sinna tekkis ka tänaseni püsiv reostus, mis vajab ohutustamist.

Veepoliitika raamdirektiiv seab veekaitse põhieesmärgiks kõikide veekogude seisundi „hea“ saavutamise. Eesti pinnveekogumitest oli 2016. aasta seisuga 54,9% heas või väga heas seisundis ning ülejäänud 45,1% veekogumitest on keskkonnanäesmärgid veel saavutamata ja nende veekogumite seisundi parandamiseks tuleb teha jõupingutusi.[1] Esimese veemajandusperioodi lõpuks ehk 2015. aastaks seatud raamdirektiivist tulenevad seisundi eesmärgid on käesoleva magistritöö käigus käsitletava Kroodi oja puhul täitmata ning seega pikendati aega eesmärgi saavutamiseks 2027. aastani.[2] Kroodi oja jääkreostuse ohutustamistööde aktuaalsuse tõttu tekkis käesoleva magistritöö autoril huvi taimede poolt reoainete omastamise uurimiseks reostusalal.

Käesolevas töös käsitletakse peamiselt arseeni poolt tekitatud raskmetalli reostust, mis mõjutab nii vee kvaliteeti kui ka lähedalasuvaid inimesi ja loomi. Magistritöö üheks eesmärgiks on erinevate raskmetallide poolt põhjustatud reostuse ohutamise viiside kirjeldamine. Teiseks eesmärgiks on reostuskolde rajoneerimine ja kolmandaks eesmärgiks Kroodi oja kohta kogutud andmete töötlemine ja uurimine, kas kohapeal kasvav harilik pilliroog (*phragmites australis*) omastab arseeni ja tsinki ning võib seeläbi osutada inimeste ja loomade tervisele ohtlikuks.

Töö autor kirjeldab magistritöös võimalikke raskmetallide reostuse ohutustamise meetodeid. Magistritöö käigus sooritati varasemate andmete analüüs, mis on vajalik, et teha kindlaks, millistest puuraukudest võetud proovides leidub arseeni. Peale arseeni leviala kindlaksmääramist sooritatakse graafiline analüüs, kuhu kantakse puuraukudes analüüsitud maksimaalsed arseeni väärtused. Sel viisil on võimalik hinnata uuringuala maa-alust reostuse levikut ja kontsentratsiooni. Parema ülevaate andmiseks reostuse asetsemisest

pinnases koostab töö autor ristlõiked, millelt selgub vertikaalsuunaline reostunud pinnase asetsemine Kroodi oja orus. Reostuse leviku graafilise analüüsi kaudu määras töö autor kindlaks kohad, kust võetakse taimedest proovid. Seda tehakse, et hinnata hariliku pilliroo võimet akumulioneerida pinnasest arseeni ja tsinki. Katse tulemustele tuginedes on võimalik anda hinnang reostuskoldel kasvavate taimede ohtlikkusest loomadele ja inimestele. Samuti kirjeldatakse käesoleval ajal kõige sobilikumat ohutustamise meetodit.

Käesoleva lõputöö lähtematerjalina on kasutatud Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ projekti "Jääkreostusobjektide inventariseerimine 2014-2015 Kroodi oja jääkreostuse ohutustamise eelprojekt".

Magistritöö koosneb sissejuhatuses, viiest peatükist, kokkuvõttest, kasutatud kirjanduse loetelust, lisadest ning graafilistest lisadest. Esimeses peatükis kirjeldatakse Kroodi oja ja tema üldseisundit. Teises peatükis antakse ülevaade reostuse tekke põhjusest, kirjeldatakse peamist reostust põhjustavat keemilist ühendit. Kolmandas peatükis esitatakse erinevad raskmetallide reostuse ohutustamise võimalused. Neljandas peatükis räägitakse varasematest uuringutest ning analüüsitakse varasemate uuringute tulemusi. Samuti analüüsitakse neljandas peatükis reostunud ala graafiliselt. Nimetatud peatükis tuuakse välja ka hariliku pilliroo võimekus omastada tsinki ja arseeni ning esitatakse sooritatud katse tulemused. Viiendas peatükis kirjeldatakse valituks osutunud ohutustamise viisi.

Hea juhendamise eest tänan juhendajaid Urmas Uri ja Erki Kõndi. Samuti tänan AS Kobras töötajaid Martin Võru, Ervin R. Piirsalu ja Marite Kirpu.

1. KROODI OJA

Kroodi oja asub Harju maakonnas Jõelähtme vallas Uusküla külas ning Harjumaal Maardu linnas. Kroodi oja kuulub Lääne-Eesti vesikonda - Harju alamvesikonda. Oja saab alguse Maardu järve põhjakaldalt ning voolab läbi Maardu linna ja suubub Muuga lahte. Oja pikkus koos lisaharudega on 5,3 km ning valgala suuruseks on 23,4 km². [3] Kroodi oja vooluhulkasid on mõõdetud Kroodi oja jääkreostuse ohutustamise projekti käigus ning samuti ka varasemalt aastatel 2011-2013 (vt tabel 1). Kõige suurem vooluhulk on nimetatud mõõtmiste käigus fikseeritud 27.12.2011, kui enne merre suubumist mõõdeti vooluhulgaks 536 l/s. Perioodi kõige väiksem vooluhulk on mõõdetud 08.07.2013, mil vooluhulk oli 236,7 l/s. [4] Kõige värskeimad andmed vooluhulga kohta on mõõdetud 21.02.2018 Eesti Keskkonnauuringute Keskuse poolt ning saadud tulemus oli 392 l/s. Mõõtmisandmetele tuginedes on Kroodi oja keskmiseks vooluhulgaks 405,6 l/s.

Tabel 1. Vooluhulkade mõõtmised Kroodi ojal [4]

Kuupäev	Vooluhulk l/s Maardu järve väljavoolul	Vooluhulk l/s Kroodi oja enne merre suubumist
27.12.2011	Vesi liiga madal mõõtmiseks	530,7
15.05.2012	12,0	536,0
23.07.2012	Vesi liiga madal mõõtmiseks	270,5
20.12.2012	Vesi liiga madal mõõtmiseks	492,8
28.05.2013	Vesi liiga madal mõõtmiseks	380,6
8.07.2013	Vesi liiga madal mõõtmiseks	236,7
15.02.2018	51,1	392,0

Kroodi oja kallastel on ajalooliselt paiknenud suured tööstusalad. Vasakkaldal asub Maardu tööstusrajoon, mille lõunapoolse osa moodustab Vana-Narva maantee äärne suurte ladude piirkond ning põhjapoolse osa Eesti suurima kaubasadama, Muuga sadama, piirkond. Oja paremkalda lõunaosas, endise Kroodi küla ja AS Eesti Fosforiit territooriumil asub mitmete ladude ning tootmishoonetega tööstuspiirkond. Kroodi oja paremkalda põhjaosas asub Jõelähtme valla Uusküla küla elamupiirkond ning Muuga sadama raudteejaam.[5]

Kroodi oja seisundit on hinnatud Lääne-Eesti vesikonna veemajanduskavas.[2] Nimetatud veekogumi koondseisund 2016. aasta seisuga on halb nii keemilisi kui ka ökoloogilisi kriteeriumeid hinnates. [1]

2. REOSTUS JA SELLE TEKKEPÕHJUSED

2.1. Ajalugu

Kroodi oja saab alguse Maardu järvest, mille veetaseme reguleerimiseks kaevati 1893. aastal järvest mereni Kroodi kraav ja ehitati pais, kuid pais purunes ning juba 1894 murdis vesi läbi paisu ning järv voolas tühjaks, uuristades pinnasesse oru, mida tänapäeval nimetatakse Kroodi ojaks. Järv taastati 1939. aastal, kui rajati fosforiidirikastusvabrik. [6]

Kroodi oja vee kvaliteedi ja hulga kujundamisel on ajalooliselt suur tähtsus olnud AS Eesti Fosforiit väljalaskudel. Kaheksakümnendatel aastatel tuli selle tehase kanalisatsioonist umbes 68% ojas voolanud veest, üheksakümnendate aastate alguses 60% ning üheksakümnendate aastate keskel umbes kolmandik. AS Eesti Fosforiit sademe-, heit-, ja kaevandusvee väljalaskude hulk ning asukoht on aastate jooksul muutunud. Olulisemad on neist kolm. Sademevee väljalasu kaudu juhiti heitvesi ojja enne šlammikoguja valmimist, hiljem on jäänud šlammikoguja puhtama tehnoloogilise heitvee ning territooriumi sademevee jaoks. Šlammikogujas puhastati AS Eesti Fosforiit reostunud tehnoloogilised heitveed keemiliselt ja suunati need Kroodi ojja. Aastatel 1989-1995 kasutati šlammikogujat veel ka kaevandusvee ojja juhtimiseks. Lühiajaliselt (1988-1994) puhastati sademevett heljuvainetest ja naftasaadustest mehaaniliselt. Kolmas olulisem Kroodi ojja juhitud heitvesi on Maardu vana linnaosa ja AS Eesti Fosforiit bioloogiliselt puhastatud olmereovesi. Kuni 1991. aastani jõudis see ojja šlammikoguja kaudu ning oli segatud tehnoloogilise heitveega. Hiljem moodustas bioloogiliselt puhastatud olmereovesi eraldi väljalasu, mille asukoht on aastate jooksul muutunud.[7]

Peale AS Eesti Fosforiiti suuruselt teiseks ojja juhitud heitvee allikaks on Maardu tööstusrajoon. See on piirkond Kroodi oja ja Pirita jõe vahel, kus asuvad mitmed suured energeetika- ja tööstusettevõtted ning ladude territooriumid. Olulisimad neist on olnud Termoil AS ja Iru Elektriijaam. Sademevett ning Iru Elektriijaama eelnevalt puhastatud tehnoloogilist heitvett on ojja juhitud sademevee kanalisatsiooni kaudu ja eelnevalt puhastamata olmereovett Maardu Vesi AS olmevee kanalisatsiooni kaudu. Termoil AS mehaaniliselt puhastatud olme- ning sademeveed on ojja juhitud eraldi, kasutades selleks

kraavi. Tööstusrajooni olme- ning sademevesi moodustas üheksakümnendate aastate esimesel poolel umbes 18% Kroodi ojas voolanud veest ja 2000. aastate esimesel poolel ligikaudu 12%.[7]

Kroodi oja vee kvaliteet oli halvim kuue- ning seitsmekümnendatel aastatel, kui oja vee kaitseks ei kasutatud isegi kõige elementaarsemaid vahendeid. Sellest ajast pärineb suurim registreeritud heljumisisaldus Kroodi ojas, kui 1975. aasta novembris mõõdeti heljumi sisalduseks 88000 mg/l ehk 8,8%. Saastamise tagajärjel settis oja sāngi heljuvainest lobri, mis mõjutab oja vee kvaliteeti tänaseni. Kuue- ning seitsmekümnendatel aastatel oli ojal kaks tähtsat heljumiallikat. Üks neist oli AS Eesti Fosforiit rikastustsehh, millest tehnoloogilise režiimi rikkumiste tõttu kandus veega välja rikastatud fosforiiti ning muud materjali. Kuna oja vee pH oli happetsehhi heitvee toimetel 2 – 4, lahustus sellest heljumist palju fluori ja fosforit ning oja vee tolleaegsed fosfori ning fluori aastakeskmised sisaldused ulatusid mitmekümnetesse milligrammidesse liitris, ületades fluori puhul aeg-ajalt ka 100 mg/l piiri. Teiseks heljumiallikaks oli happetsehh, kus valmistati (arseno)püriidist vāāvelhapet. Püriidi põletusjāāgi, mis tänapāēval liigitatakse ohtlike jāātmete hulka, juhtis AS Eesti Fosforiit Kroodi oja. Hiljem on püriidi põletusjāāke kasutatud ka Kroodi oja orus täitepinnasena. Püriidijāātmete oja juhtimise ajal mõõdeti oja vees raua- ja vasesisaldust kümnetes milligrammides liitris (1974. a: Fe-64,5 mg/l; Cu-19,2 mg/l) ning arseenisisaldust milligrammides liitris (1974. a: 3,2 mg/l).[7] 2015. aastal võetud veeproovidest leiti Kroodi oja alamjooksul arseeni 15 µg/l ja tsinki 30 µg/l.[8] Sama aasta aprillikuus alamjooksul võetud veeproovis oli arseeni 18 µg/l ja tsinki 83 µg/l. Arseeni ja tsingi vastavad piirmāārad maismaa pinnavees on 10 µg/l. [9]

1960. aastal toodeti Maardus juba vāāvelhapet ja superfosfaati. Tooraineks oli Venemaalt toodud püriit. Vāāvelhappe tootmisel põletatakse püriiti, mille kāigus saadakse SO₂. Põletusjāāgiks on raudoksiid, mis esineb hematidi ja magnetiidina. Vāāvelhapet toodeti tõenäoliselt arseeni sisaldavast püriidist ja arsenopüriidist. Nende põletamisel tekkinud rauaoksiidid on kõrge arseenisisaldusega ning vāāvelhappe tootmise jāāgid transporditi Kroodi oja orgu, millega reostati nii pinnas kui ka vesi.[10]

Seitsmekümnendate aastate teisel poolel toimus Kroodi oja vee kvaliteedi paranemine. See saavutati rikastustsehhi drenaaži suunamisega flotoliivade kogumisalale ja vāāvelhappe toorainena eheda vāāvli kasutuselevõtuga. Sellega langes heljumi, Fe, As, Cu, F ja P sisaldus oja vees. Sel ajal kerkisid üles probleemid šlammikogujaga. Projektijārgselt oli ette nāhtud

AS Eesti Fosforiit heitvesi neutraliseerida lubjapiimaga ning seejärel tekkiv CaF_2 (fluoriit) ja $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (fosforiit) heljum šlammikogujas välja setitada. Küll aga ei jätkunud AS Eesti Fosforiit jaoks nõukogude defitsiidimajanduses alati lupja ning kasutusele võeti ka ammooniumhüdroksiid. See neutraliseerib happelise vee, kuid ei sadesta välja fluori- ja fosforiühendeid. Seetõttu heitvee keemiline puhastus ei toiminud ja lisaks fluori- ning fosforiühenditele saastas šlammikoguja Kroodi oja vett ka ammooniumiga. Kaheksakümnendatel aastatel oli šlammikoguja väljalask oja vee suurimaks reostajaks. Fosfori osas mõjutasid vee kvaliteeti ka AS Eesti Fosforiit sademevesi ning oja sāngi kuhjunud fosforiidisete.[7]

Kaheksakümnendate aastate teise pooleni laienes tootmistegevus Kroodi oja orus pidevalt. Kuna piirkonna veevarudest ei piisanud, haarati vajalik vesi kaugemalt – Iru Elektri jaam Pirita jõest ning AS Eesti Fosforiit Jõelāhtme jõest. Tekkiv heitvesi juhiti Kroodi ojja. Sellest tulenevalt suurenes Kroodi oja vooluhulk kaheksakümnendate aastate teise pooleni, mil saavutati maksimaalne tase. Edaspidi toimus AS Eesti Fosforiit tootmise vähenemine, mis kajastus Kroodi oja vooluhulkade vähenemises.[7]

1992. – 1993. aasta vahetusel šlammikoguja tühjendati ja pärast seda pole see enam oja suurte ammooniumikogustega ohustanud. Säilinud on reaalne oht mitmete aastate jooksul šlammikoguja põhja sadestunud $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ja CaF_2 sisaldava lobri poolt, mis happelistes tingimustes võib lahustuda ning põhjustada oja lõõkreostumist fosfori ja fluori ühenditega. 1997. aastal pärines 23% Kroodi oja ammooniumisisaldusest šlammikogujast. 2015. aastal šlammikogujast väljavoolu Kroodi ojja enam pole. Perioodil 2011-2013 võetud proovides oli fosfori keskmine sisaldus ojas 0,071 mg/l, mis on pigem madal ja näitab, et šlammikoguja ei mõjuta Kroodi oja oluliselt.[10]

Ojavee reostumine aastatetaguse saastega toimus 1994. aasta lõpus ning 1995. aasta alguses, kui põhjavee taseme tõusu tõttu ujutati üle AS Eesti Fosforiit territooriumil reostunud pinnasekihid. Selle tagajärjel ligunes saastunud ala drenivette fluori kuni 236 mg/l ja fosforit kontsentratsioonini 1300 mg/l ja fosforisisaldus Kroodi oja vees tõusis maksimaalselt 20 milligrammini liitris. Olukord lahendati uue väljavoolu avamisega kaevandusveele, mis alandas põhjaveetaset ja parandas vee kvaliteeti. Sellega kaasnes oja vee fluorisisalduse langemine 1996. – 1997. aastaks viimase kolmekümne aasta madalaimale tasemele. Samasugust vähenemist ei toimunud fosfori osas. Seda seetõttu, et AS Eesti Fosforiit territooriumil alustasid tööd väetistega tegelevad aktsiaseltsid, kes olid lohakad.

1996. aastal ulatus territooriumi sademevee väljalasus fosforisisaldus kuni 230 mg/l ja lämmastikuisaldus 140 mg/l. Reostuse põhjustanud ettevõtte jäi toona välja selgitamata. Ojas oli fosforit keskmiselt 5 mg/l ja lämmastikku 9 mg/l. Veerandi oja lämmastikukoormusest andis kaevandusvee väljalask.[7]

2.2. Arseen (As)

Kroodi oja suurimaks reostajaks on arseen. Arseen on lõhnatu ja praktiliselt maitsetu hõbehall või valge-metallik element. Puhtal kujul on arseen metall ning seda esineb looduses harva. Üldiselt leidub arseeni ühe või mitme ainega seotuna. Arseeni toodetakse ka koobalti, vase ja plii sulatusahjude käitamisel kõrvalsaadusena. Arseeni kasutatakse puidukaitsevahendites, puuvilla pestitsiidides, raskmetallide legerimisel või karastamisel, mõnede klaasisortide tootmisel, ravimites ja mujal. Arseen on tuntud ka kui mürk. Suurtes kogustes arseenirikka õhu sissehingamine võib põhjustada surma. Samuti on arseen ka kantserogeen ning võib põhjustada erinevaid vähihaigusi, näiteks kopsu-, põie-, naha-, neeru-, maksa- ja eesnäärmevähki. Veel võib arseen suurendada areneva loote kahjustuste riski. Väikeste kogustega kokkupuutumisel võib see tekitada iiveldust, veresoonte kahjustusi, oksendamist, nahatüükaid, nahaturseid ja punetust, ebaregulaarset südamerütmi, vereliblede tootmise vähenemist ja närvitalituse puudulikkust.[11] Surmav arseenikogus inimese jaoks on 2-20 mg/kg kehakaalu kohta päevas.[12] Üks olulisemaid kasutuskohti arseeni jaoks on elektroonikatööstus, kus seda kasutatakse transistorites. Nimelt lisatakse arseeni elektrijuhtivuse parandamiseks pooljuhtidele. Arseeni kasutatakse ka kuullaagrites hõõrdumist vähendava aienena.[13]

2.3. Arseeni leostumine

Leostumiseks nimetatakse liikuva pinnaseveega mineraalainete väljauhtumist pinnasest. Varasema reostusuuringu käigus on läbi viidud leostumiskatsed, kus võeti reostunud pinnasest ja setetest proove, mille käigus määrati raskmetallide leostuvust. Leostuskatsete tulemused koguti magistritöö käigus kokku ning nende põhjal koostati tabel 2. Katsed näitasid, et arseeni leostumine on väike (vt tabel 2). Samuti näitab arseeni vähest leostumist fakt, et Kroodi oja vees on madal arseenisisaldus. Kroodi oja orus leiduv arseen võib olla väikese leostuvusega seetõttu, et väävelhappe tootmisel on püriidi särdamisel üheks protsessi jäagiks hematiit, mis seob hästi arseeni.[14]

Tabel 2. Arseeni leostuvus pinnasest

Element	Keskmine sisaldus proovis, mg/kg KA (standardhälve)	Sisaldus leostisest, mg/kg KA (standardhälve)
As (4 proovi)	245,8 (189,3)	7,4 (4,0)

*KA-kuivaines

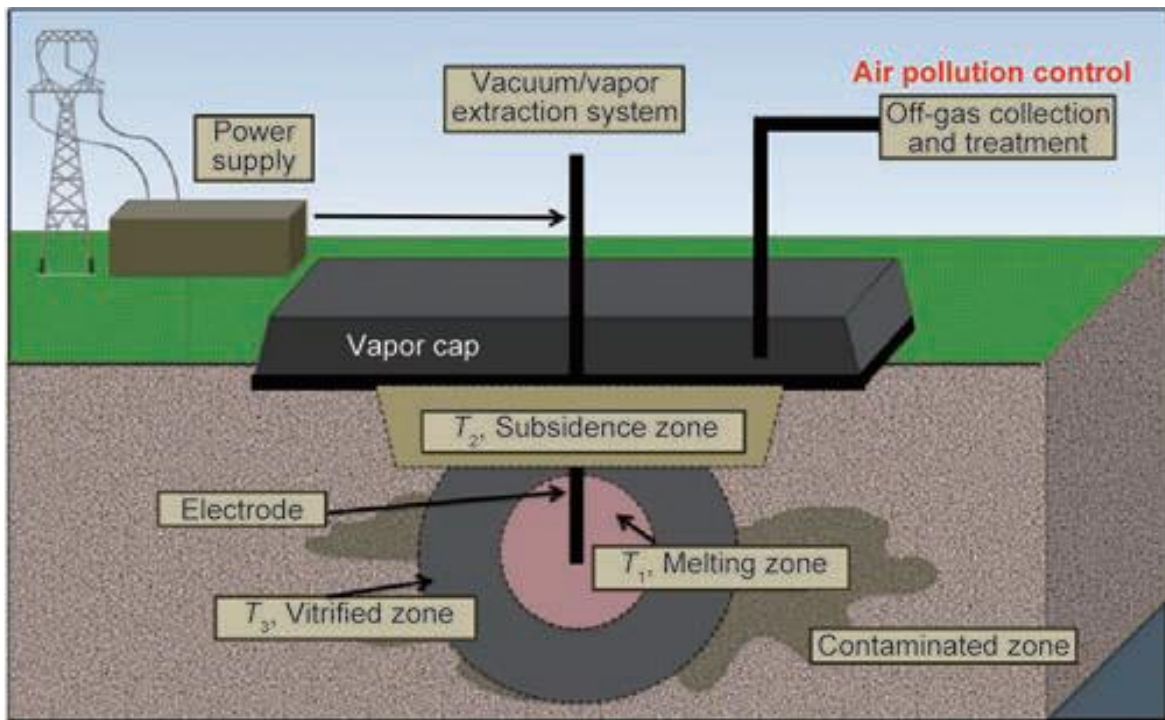
3. OHUTUSTAMISE VÕIMALUSED

Arseeniga reostunud pinnase ohutustamiseks on Ameerika Ühendriikides kasutatud arseeni immobiliseerimist, seda stabiliseerides või tahkestades. See vähendab arseeni leostuvust, ökotoksilisust ning kokkupuudet inimestega. Arseeni algne kontsentratsioon säilib, kuid see on ohutumal ning inertsamal kujul.[5]

3.1. Vitrifikatsioon

Alternatiivse lahendusena on kasutatud vitrifikatsiooni (vt joonis 3.1). Vitrifikatsioon on protsess, kus kasutatakse väga kõrgeid temperatuure (1600-2000 °C), et sulatada saasteained ja pinnas klaasitaoliseks tahkiseks. See meetod on levinud radioaktiivsete jäätmete käitlemisel. Sulatatud pinnas/saasteaine omandab obsidiaanile sarnased omadused ja on üle kümne korra tugevam kui betoon. Sulanud mulda ja saasteaineid kiiresti jahutades on kristalliseerumine välistatud ja stabiilne klaas valmib mittelenduvatest materjalidest. Lenduvad ained desorbeeruvad ja neid käsitletakse kui heitgaasivoogu. Suur osa pinnase orgaanilisest materjalist pürolüüsub hapnikuvaeses sulamiskeskmes enne klaasi pinnale ladestumist ja oksüdeerumist. Pinnase vitrifikatsiooni kasutatakse üldiselt *in situ* protsessina. *In situ* vitrifikatsiooni käigus kantakse soojus pinnasesse tavaliselt molübdeenelektroodidega, millele lisatakse tihti grafiidset või klaasilist materjali, et sulamisprotsess algaks kiiremini. Peale pinnase mineraalide sulamist lülitatakse elektroodid välja, mis omakorda lubab pinnasel jahtuda, mille käigus moodustub klaasne mass. Olenevalt sulatatava pinna mahust võib jahtumine kesta kuni ühe aasta. Klaasist mass jäetakse paigale, kuid kuna vitrifikatsioon põhjustab pinnase ruumala kahanemist 20-40% ulatuses, tuleb protsessi toimumiskoht järgnevalt pinnasega täita. Klaasistunud tahke aine on vastupidav perioodilisele külmumis-sulamisprotsessile, ilma et see saasteaineid eritaks. Õhusaaste käitlemine on sarnane teiste *in situ* termiliste tehnoloogiatega. Kasutatakse kottfiltreid, mehaanilisi ja elektrostaatiliselt filtreid ning gaasid põletatakse. [15]

Klaasistamist saab kasutada erinevate pinnaste ja erinevate orgaaniliste reostuste puhul, kuid seda kasutatakse rohkem ohtlike mitteorgaaniliste ainete, nagu näiteks raskmetallide, reostuse ohutustamiseks. [15]



Joonis 3.1 Vitrifikatsioon [15]

3.2. Pinnasepesu

Pinnase ohutustamiseks kasutatakse ka pinnasepesu, mis on tehnoloogia, mida saab kasutada nii *in situ* kui ka *ex situ*, kus suspensioonilahusesse pannakse reostunud pinnas ja sealt eemaldatakse peenete osakeste külge kinnitunud reoained. Pinnasepesu tehnoloogia korral, mida kasutatakse *in situ*, pestakse reoained kemikaalide või veega reostuskoldest välja ning suunatakse edasisele töötlusele.[5] *In situ* tehnoloogiad on odavamad, kuid kulutavad pinnase puhastamiseks soovitud tasemeni rohkem aega. Teisalt võib aga kasutada *ex situ* pinnase tervendamist, mis tagab kõrgema efektiivsusega ja usaldusväärsema pinnase puhastamise lühema tööajaga.[16]

3.2.1. In situ pinnasepesu

In situ tehnoloogia korral eemaldatakse saasteained pinnasesse läbipesuvedelikku pumbates. Seejärel kogutakse läbipesuvedelik kokku, vajadusel kasutatakse uuesti ning lõpuks puhastatakse ja piisava puhtusastme saavutamisel juhitakse tagasi loodusesse. Seda tehnikat kasutatakse homogeensetes jämeda tekstuuriga muldades, millel on suur läbilaskevõime. Mulla pesemisel pesuvedelik pumbatakse või immutatakse pinnasesse. Raskmetallide efektiivseks pinnasest eemaldamiseks peab loputusvedelik olema disainitud kindla valemi järgi olenevalt pinnasest ja selles leiduvatest saasteainetest. [17]

In situ pinnasepesu on tehniliselt lihtne, kuid võib olla ka raskesti teostatav ja kallis, sest pesuvedeliku kogumiskaevude või pinnaaluste lahusekogujate rajamine võib olla keerukas. Kui põhjavesi pole sügaval, pumbatakse seda tavaliselt välja, et saada kätte pesuaineid ja leostunud saasteaineid. [17]

Metallide väljaloputamise efektiivsus on madal savistes pinnastes ja muldades, millel on kõrge katioonide vahetus- ning puhverdusvõimekus. Uurimused on näidanud, et *in situ* on efektiivne plii (Pb) happelistest liivastest muldadest eraldamisel, kaadmiumi (Cd) eraldamisel madala katioonide vahetusvõimekusega pinnastest ja keskmiselt happelistest muldadest ning kroomi (Cr(VI)) ja arseeni (As) raua oksiidist ja kõrge pH läbilaskvusega pinnastest eraldamisel. Selle tehnika kasutatavus on suuresti mõjutatud mulla heterogeensusest ja ladustuse korrast. [17]

In situ pinnasepesu kasutamine antud reostusobjektile oleks keerukas, kuna, nagu eelnevalt kirjeldatud, on Kroodi oja kaldale looduslike kihtide peale veetud erinevaid pinnaseid ja pinnasekihid on omavahel segamini. Seega poleks võimalik tagada ühtlast pinnasepesu ning samuti oleks keerukas tagada läbipesuvedeliku kokkukogumine, kuna objekt asub oja kaldal ning kindlasti tuleks vältida pinnasepesu vedeliku sattumist Soome lahte. [17]

3.2.2. Ex situ pinnasepesu

Pinnasepesu protsesse peetakse üheks efektiivseks *ex situ* tervendamise tehnoloogiaks, mille peamine pinnasest reostuse eemaldamise meetod on saasteainete desorptsioon. Saasteained kaevatakse reostuskoldest välja, seejärel kaevatud pinnast segatakse ja pestakse intensiivselt pesuvedelikuga. Uuringud on näidanud, et ultraheli võib märkimisväärselt tõhustada raskmetallide eemaldamise efektiivsust keskkondades, kus ainult lihtsalt mehaaniline pesu soovitud tulemust ei anna.[16]

Pinnasepesu on ühendatud mehaaniline ja keemiline protsess, kus raskmetallid eraldatakse saastunud pinnastest pestes mulda reostuskoldest eemal spetsiaalselt pesuks loodud lahendustega. Töö käigus kaevatakse saastunud pinnas, transporditakse töötluspaigale, purustatakse suuremad pinnaseosad ning pinnas sõelutakse läbi, et eraldada suured osakesed, nagu plastijäägid, puit ja kivid. Magnetilised materjalid eraldatakse mullast magneteid kasutades. Sõelutud muld segatakse korralikult pesemislahusega ultraheliga töödeldes või mehaaniliselt segades. Seejärel sõelutakse või keerispuhastatakse töödeldav materjal, et eraldada jämedateraline liiv ja kruus mudast ning saviosakestest. Jämedakoelised osakesed on vähem saastunud ja tavaliselt viiakse need peale veega loputamist tagasi kaevepaika. Muda ja saviosakesed, mis on seisnud pesemislahuses, kogutakse setitamise teel, loputatakse veega ja viiakse tagasi kaeve asukohta. Kasutatud pesulahust ja loputusvett kasutatakse uuesti või juhitakse reoveepuhastisse edasiseks käitlemiseks. Saadud reovett töödeldakse enne prügilasse viimist tahkestamise/stabiliseerimise teel.[17]

Mullapesu eeldab, et pesulahus mobiliseerib raskmetallid, muutes mulla happelisust, lahuse ioonilist tugevust, redokspotentsiaali või komplekssust. Ideaalne pesulahus peaks oluliselt parandama raskmetallide osakeste lahustuvust ja pinnases püsivate osakeste liikuvust ning samuti peaks see olema mittetoksiline ja biolagunev. Kui ühte pesulahust, mis usaldusväärselt eraldaks kompleksed koostisosad mullast, pole võimalik koostada, võib kasutada järjestikust pesemist erinevate lahustega.[17]

Mulla pesuks võib kasutada mineraalide töötluks arendatud varustust, nt trumleid, sirme, keerispuhasteid ja tsentrifuuge. Seda tehakse, et vähendada mulla transpordikulusid.[17]

3.3. Pinnase elektrokineetiline tervendamine

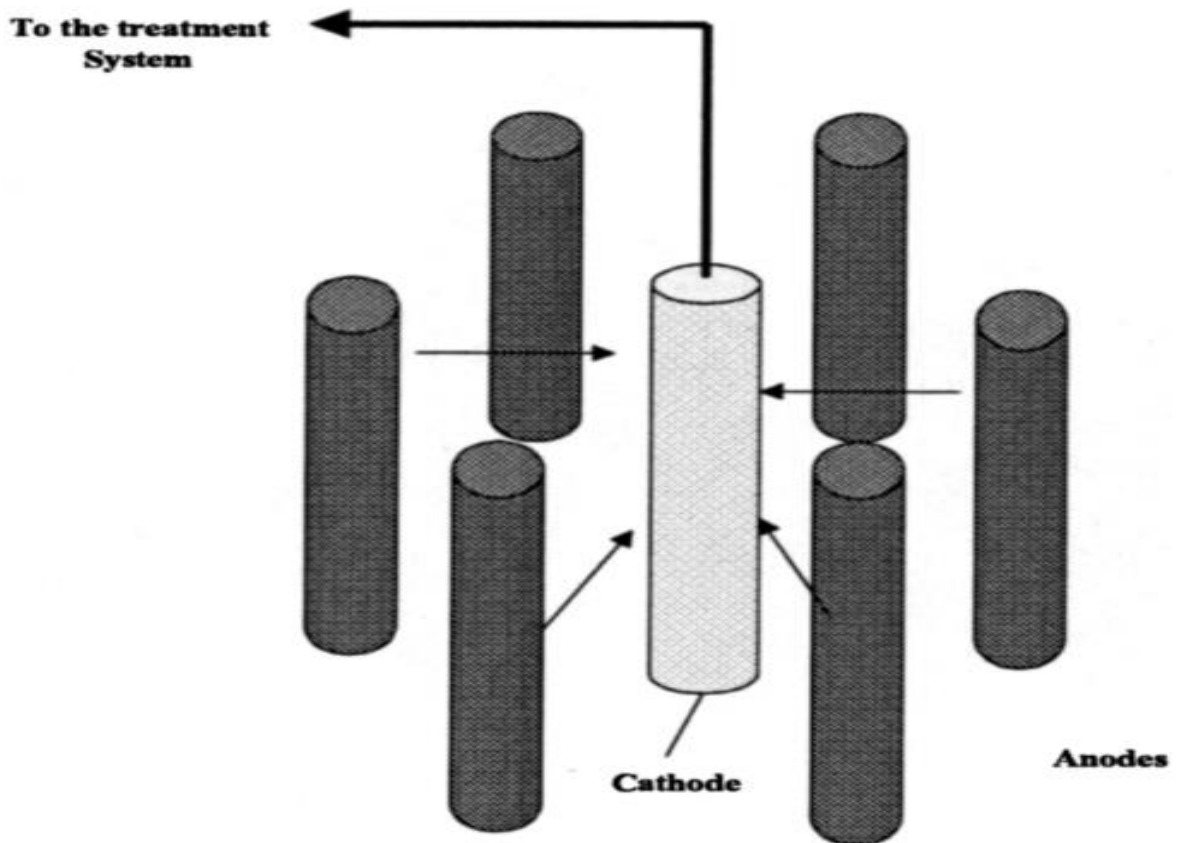
Elektrokineetiline tervendamine on pinnase kohapeal puhastamise moodus, mis põhineb reoainete liikumisel elektriväljas, mida nimetatakse elektromigratsiooniks või vee positiivselt laetud molekulide liikumisel piki pinnaseosakeste pinda katoodi poole, mida nimetatakse elektroosmoosiks. Elektrokineetiliselt on võimalik mullast eraldada raskmetalle ja radionukleotiite, kuid ka orgaanilisi polaarset reoaineid. Reoaine elektromigratsioon sõltub pinnase poorsusest, elektrijuhtivusest, rekendatava elektrivälja tugevusest, pH gradiendist ja reoaine kogusest pinnases. Elektroosmoosi puhul liiguvad koos veega pinnases lahustunud neutraalse või positiivse laenguga reoained. Elektroosmoos soodustab ka mikroorganismide levimist pinnases.[18]

Elektrokineetiline puhastamine toimub madalasagedusliku otsese elektrivoolu abil, mida juhitakse elektrootide (katood/anood) abil maasse. Selle tulemusena saastunud pinnases olevad katioonid migreeruvad katoodi, samal ajal kui anioonid liiguvad anoodi. Elektrokineetilise remediatsiooni tõhustamiseks kasutatakse mitme anoodiga süsteemi (vt joonis 3.2). Teine variant kasutada elektrokineetilist remediatsiooni tõhusamalt, on „Lasanje“-mudeliga anoodide ja katoodide jaotus. Selliselt on võimalik kasutada katoodi heitvett uuesti, suunates selle tagasi anoodi sektsiooni, mis soodustaks pH neutraliseerimist ja lihtsustaks vee töötlust. Lisaks on võimalik selle töötlusega muuta ka polaarsust vahetades vedelike liikumise suunda. Polaarsust vahetades soodustatakse ka mitmete saasteainete töötlustsoonide läbimist, väheneb ebaühtlaste potentsiaalide teke ning pH suur erinevus pinnases. Seda meetodit saab kasutada nii horisontaalselt kui ka vertikaalselt. Oma nimetuse sai see tänu oma kihilisele ehitusele, kus elektrootide vahel on töödeldava pinnase kihid (vt joonis 3.3). Tänu oma kihilisele ehitusele on see meetod efektiivne saasteainete eemaldamiseks ka sügavamatest pinnasekihtidest. Kuni sügavusega 15 m reostuskollete ning vähetihenenud pinnaste puhul on sobilikum kasutada vertikaalset lahendust.[19] Metallist reoained, mis on kontsentreeritud polariseeritud elektrootidele, eemaldatakse kas galvaanilise katmisega, lahust pumbates või ionide vahetamise teel.[17] Kui kasutatakse varianti, kus reoained pumbatakse pinnasest välja lahustunud kujul, on vaja lahust ka edasiselt töödelda. Selleks rajatakse üldiselt ajutine puhasti, kus sadestatakse pH tõstmise

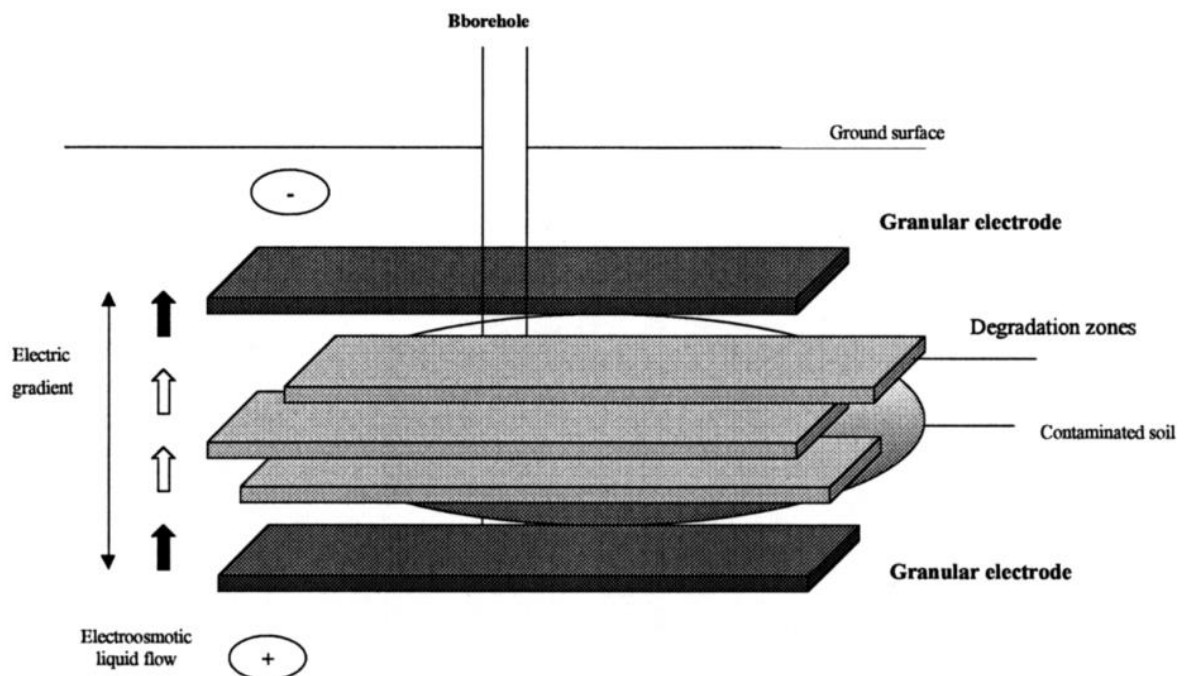
teel raskmetallid lahusest välja. Tekkinud sade filtreeritakse ning transporditakse ohtlike jäätmete prügilasse.[10]

Elektrokineetilist pinnase reoainetest puhastamist on testitud alates hilistest 1980. aastatest. Enamasti on see tehnika efektiivne peeneteraliste ja väikese hüdraulilise juhtivusega muldade puhastamiseks. See tehnika on sobiv veega küllastunud ja küllastumata pinnastele. Protsessi edu sõltub kindlastest tingimustest, mis tööalal valitsevad, ehk saasteaine kogusest ja tüübist, mulla tüübist, pH-st ja pinnase orgaanilisest koostisest. Protsessi efektiivsust mõjutavad ka pinnases paiknevad metallist objektid. Metallioonide mullas liikumise üldisest kiirusest ja saasteainete hulgast sõltudes võib elektrokineetiline pinnase puhastamine kesta mõnest päevast mitme aastani.[17]

Raskmetallide liikumise suund, kiirus ja kvantiteet on määratud metalli liigi, metallioonide liikuvuse, lahuse metallikontsentratsiooni, mulla tüübi, mulla struktuuri, mulla niiskusesisalduse ja mullalahuse keemiaga. Migratsioon on mõjutatud veel ka potentsiaalsest imendumisest, sadestumisest ja reoainete lahustumisest protsessi ajal. Protsessi toimides raskmetallide sisaldus pinnases väheneb ning sellega kaasneb protsessi kiiruse vähenemine, et seda parandada ja pinnase puhastamist kiirendada, tuleb pinnasesse viia keemilisi lisandeid, mis aitaksid imendunud metalle mobiliseerida.[19]



Joonis 3.2 Mitme anoodiga elektrokineetilise remediatsiooni.[19]



Joonis 3.3 Elektrokineetilise remediatsiooni „Lasanje“-meetodiga.[19]

3.4. Fütoremediatsioon

Fütoremediatsioon on pinnases olevatest reoainetest toituvate taimede kasvatamine reostunud pinnasel eesmärgiga eemaldada või stabiliseerida raskmetalle või teisi reoaineid pinnases.[17] Fütoremediatsioon jagatakse eraldi gruppidesse.

3.4.1. Fütoekstraktsioon

Fütoekstraktsioon on meetod, kus taim võtab kas pinnasest või veest reoaineid ja kuhjab need enda maapealsesse biomassi ehk võrsetesse. Väga oluline osa efektiivses fütoekstraktsioonis on taime biokeemilisel protsessil, kus taim viib raskmetallid või muud reoained juurtest võrsetesse, sest taime maapealse biomassi kogumine on lihtne, kuid juurte biomassi kogumine on praktiliselt teostamatu. Fütoekstraktsioon on ka kõige kasulikum fütoremediatsiooni tehnika, sest nii saab raskmetalle ja metalloide reostunud pinnasest, veest või setetest kätte ning see on ka kõige tulusam meede. Protsessi efektiivsus sõltub mitmetest faktoritest, nagu näiteks raskmetallide bioloogiline kättesaadavus, pinnase omadustest ja kasutatavast taimeliigist. Fütoekstraktsiooniks sobilik taim peaks kiiresti kasvama, taime maapealse osa biomassitootlikkus peaks olema suur, taim peaks omama laialt levivat ja hargnevat juurtesüsteemi, taimel peaks olema võimekus koguda pinnasest soovitud raskmetalli, taim peaks olema vastupidav kogutavate raskmetallide mürgisusele, taim peaks suutma transportida kogutavaid raskmetalle juurtest võrsetesse, taim peaks olema võimekas kohanema paigapealse keskkonna ja kliimaga, resistentne taimekaitsevahenditele, teda peaks olema lihtne kasvatada ja koguda ning ta ei tohiks olla sobilik taimetoiduliste loomadele, et raskmetallid ei satuks toiduahelasse.[20]

3.4.2. Fütofiltratsioon

Fütofiltratsiooniks nimetatakse taimede poolt reoainete eemaldamist pinnaveekogudest või reovetest. Protsess võib toimuda taime juurte, võrsete või mõnede taimede puhul ka terve taimekeha poolt. Fütofiltratsioonis imab taim saasteained endasse või koonduvad saasteained taime pinnale ja sellega on nende liikumine ning levimine vees minimeeritud.[20]

3.4.3. Fütolendumine

Fütolendumiseks nimetatakse protsessi, kus taim imab pinnasest reoained ja taimesiseste bioloogiliste protsesside tulemusel käideldakse reoaineid nii, et need muutuvad lenduvaks ning vabanevad atmosfääri. Seda tehnikat saab kasutada mõnede raskmetallide ning samuti ka orgaanilise reostuse puhul. Selle töötamise miinuseks on aga asjaolu, et see ei eemalda reoainet täielikult, vaid paigutab selle ümber pinnasest atmosfääri. Seepärast on see ka kõige vastuolulisem fütoremediatsiooni tüüp. [20]

3.4.4. Fütostabilisatsioon

Fütostabilisatsioon ehk fütobilisatsioon on protsess, kus kindlate taimede kasutamisega stabiliseeritakse pinnases teatud reoained. Seda tehnikat on kasutatud reoainete bioloogilise kättesaadavuse ja liikuvuse vähendamiseks keskkonnas ning seega ära hoida nende sisenemine põhjavette või toiduahelasse. Taimed immobiliseerivad pinnases raskmetalle sorptsiooni, sadestumise või metalli valentsuse vähenemise teel risosfääris. Erineva valentsusega metallid on erineva mürgisusastmega. Eriliste redoks ensüümide eritamisega muudavad taimed ohtlikud metallid vähem mürgiseks ja vähendavad ohtlike ainete poolt tekitatud stressi ja kahju. Fütostabilisatsioon piirab raskmetallide kuhjumist elustikus ja minimeerib raskmetallide leostumist põhjavette. Küll aga pole

fütostabilisatsioon lõplik lahendus pinnase puhastamisel, kuna raskmetallid jäävad pinnasesse ja piiratakse vaid nende liikumist.[20]

3.4.5. Risodegradatsioon

Risodegradatsioon ehk taimlagundamine on orgaaniliste saasteainete lagundamine pinnases mikroorganismide poolt risosfääris. Risosfäär ulatub umbes 1 millimeetri kaugusele taimejuurest ja on tugevalt taime poolt mõjutatud. Risosfääris kasvab mikroobide metaboolne aktiivsus ja arvukus ning seetõttu toimub seal reoainete lagundamine kiiremini. Taimed suudavad mikrobioloogilist aktiivsust risosfääris tõsta umbes 10-100 korda. Seda tänu eksudaadile, mis sisaldab süsivesikuid, aminohappeid ja flavonoide. Taime juurte poolt vabastatavad toitained, mis sisaldavad eksudaate, varustavad süsiniku ja lämmastikuga pinnase mikroobe ning nii luuakse toitaineerikas keskkond, kus mikroobidel on kõrgendatud aktiivsus. Lisaks orgaaniliste substraatide eritamisele, mis lihtsustavad risosfäärsete mikroorganismide kasvu ja muudavad neid aktiivsemaks, eritavad taimed ka ensüüme, mis on võimelised orgaanilisi saasteaineid pinnases lagundama.[20]

3.4.6. Fütodegradatsioon

Fütodegradatsioon on protsess, kus orgaanilised saasteained lagundatakse taimes ensüümide abil. See protsess pole risosfääri mikroorganismidega seotud. Taimed suudavad koguda kehavõõraid orgaanilisi ühendeid saastunud keskkondadest ja läbi enda metaboolse tegevuse vähendada nende mürgilisust. Fütodegradatsiooniga saab eemaldada siiski vaid orgaanilisi saasteaineid, sest raskmetallid pole biolagunevad.[20]

3.4.7. Fütokaevandamine

Fütokaevandamiseks nimetatakse protseduuri, kus taime biomass, mis on raskmetalle kogunud, põletatakse energia tootmise eesmärgil ja allesjäävat tuhka käideldakse kui bioloogilist maaki. Biomaaki saab kasutada raskmetallide eraldamiseks. Fütokaevandamise üheks eeliseks on biomassi põletamisest tekkiva energia müük. Biomaakide käitlemine eritab atmosfääri vähem SO_x heidet kui kivisöe põletamine oma vähese väävlisisalduse tõttu. Seetõttu on fütokaevandamine keskkonnasõbralik ja ökoloogiline meetod võrreldes teiste raskmetallide eraldamise meetmetega. Kuid fütokaevandamise tööstuslik tasuvus sõltub mitmetest erinevatest faktoritest, nagu fütoekstraktsioonist ja käideldavate metallide hetkelisest turuväärtusest. Fütokaevandamist on tööstuslikult kasutatud nikli puhul ja see on osutunud kasumlikuks. Rangemate õigusaktide jõustamine keskkonnareostusele muudaks fütokaevandamise ilmselt atraktiivsemaks.[20]

3.5. Bioloogiline tervendamine

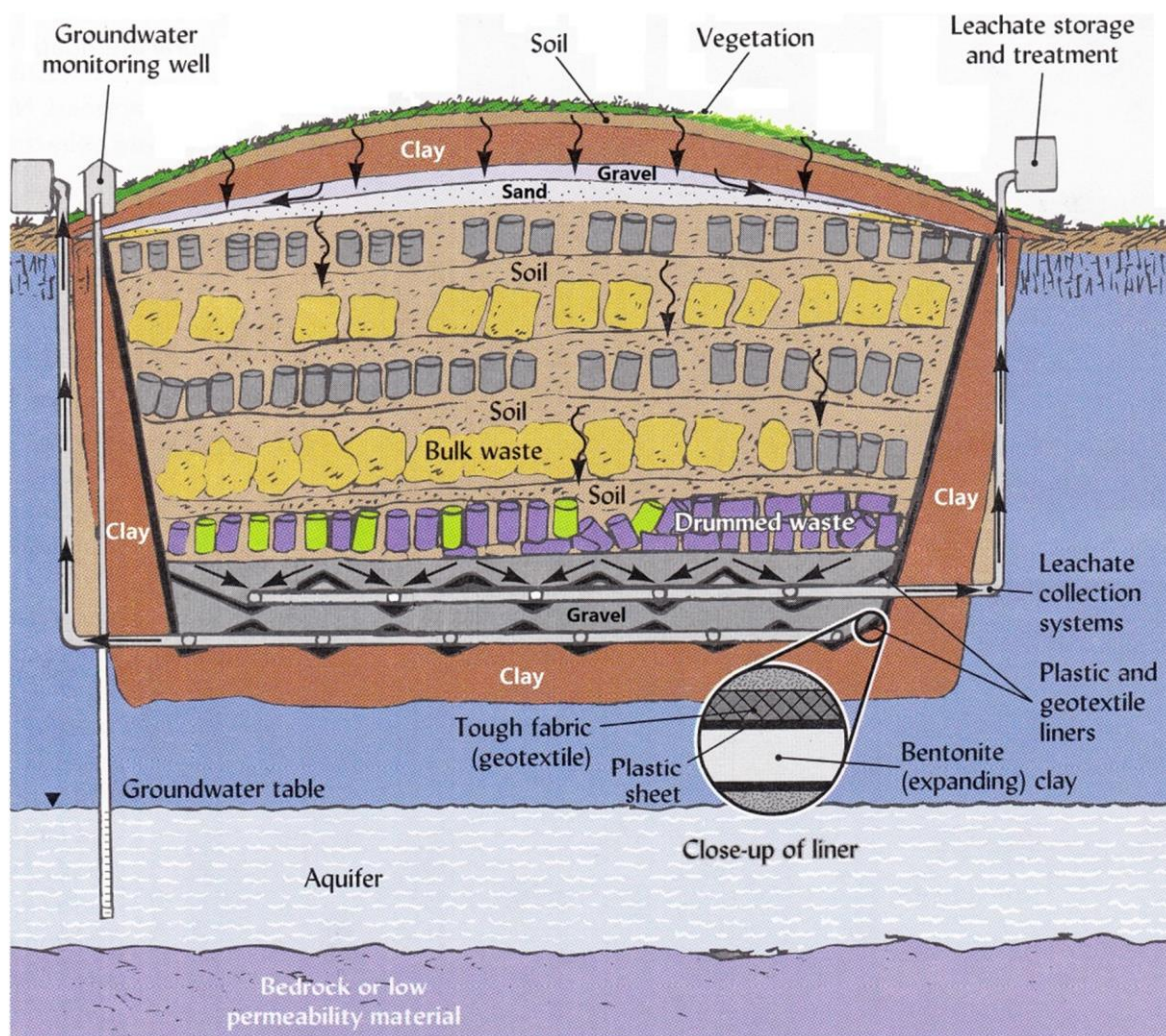
Bioloogilise tervendamise eesmärk on pinnase puhastamine kasutades taimede asemel mikroorganisme. Seda tehnikat on rohkem kasutatud orgaaniliste reoainete mürgitustamiseks pinnases ja põhjavees. Raskmetallidega reostunud pinnase puhastamisel kasutatakse bioremediatsiooni üldiselt koos teiste pinnase rediatsiooni tehnikatega, näiteks koos pinnasepesuga ja fütoekstraktsiooniga, et soodustada raskmetallide lahustuvust enne nende väljapesu või neeldumist taimedesse. Nii toodavadki mitmed bakterid bioaktiivseid aineid, mis suudavad metalle pinnastes lahustada. Mõned risosfääri mikroobid soodustavad taimede vastuvõtlikkust raskmetallidele ja nende kasvu reostunud pinnases. Bioloogilise tervendamise käigus külvatakse valitud mikroorganismid saastunud pinnasele pihustamise teel või infiltreerides. Kui saasteained on sügaval pinnases, saab mikroorganismide viimiseks sügavale pinnasesse kasutada kaevusid. Ka toiteaineid ja hapnikku kasutatakse mikrobioloogilise aktiivsuse tõstmiseks ning sellega paraneb ka bioloogilise tervendamise kiirus. Seda tehnikat on seni kasutatud vaid orgaanilise reostuse likvideerimiseks. Raskmetallidega seda katsetatud veel pole.[17]

3.6. Reostuse isoleerimine

Üheks võimaluseks reostuse ohutustamisel on reostuse isoleerimine ülejäänud keskkonnast. See tähendab reostatud pinnase eraldamist puhtast pinnasest, kuid mulla täielikuks tervendamiseks on vaja kasutada täiendavaid meetmeid. Isoleerimise tehnoloogiad on üldiselt disainitud selliselt, et raskmetalle ja teisi saasteaineid hoitakse juba saastunud piirkonnas. Pinnase isoleerimist kasutatakse vältimaks edaspidist põhjavee saastamist raskmetallidega kui teised pinnase tervendamise meetodid pole majanduslikult või füüsiliselt teostatavad. Võimalik on ka reostus isoleerida ajutiselt perioodiks, kui toimub pinnase tervendamiseks vajalike tööde hindamine ja hiljem ka pinnase tervendamine. Piiramaks vee voolu läbi saastunud pinnase, eraldatakse saastunud ala ülejäänud põhjaveevoolust kasutades maa-aluseid tõkkeid. Maa-alused tõkked piiravad saastunud põhjavee voolu läbi puhta pinnase ning samuti ka puhta põhjavee voolu läbi saastunud pinnase. Vertikaalsed maa-alused tõkked piiravad põhjavee külgsuunalist liikumist ning neid saab asetada nii allavoolu kui ka ülesvoolu, kuid nendega võib piirata ka kogu saastunud piirkonna. Vertikaalsed tõkked ehitatakse tihti koos maapealse kattega, et piirata puhta pinnasevee infiltratsiooni saastunud pinnasesse. Tõkkeid pole otstarbekas pinnasesse ehitada sügavamale kui 9 meetrit ning efektiivselt pinnase saastunud osa isoleerimiseks peaks kiht olema halvasti vettjuhtiv.[21]

3.7. Prügilasse ladestamine

Prügilasse ladestamine (vt joonis nr 3.4) on kõige lihtsam pinnase tervendamise tehnika, kus reostunud pinnas eemaldatakse ning viiakse kõrvaldamiseks prügilasse. Prügila on rajatis, kuhu on projekteeritud vett läbilaskvad kihid, lekkevee drenaaž ning läbimatud kihid olemasoleva pinnase ja reoainete vahele. Vältimaks võimalikke lekkeid ja põhjavee saastumist, peab prügila koosnema mitmekihilistest vooderdistest ning prügilas peab olema ka lekke kogumise ja jälgimise süsteem. Prügila katmisel on eesmärgiks minimeerida vihmavee juurdepääs jäätmetele ning juhtida vihmavesi prügilast eemale. Prügilate ehitamiseks ja kasutamiseks kehtivad seadusandlusega kehtestatud seadused ja määrused.[17]



Joonis 3.4. Prügila läbilõige[17]

4. UURINGUD

4.1. Varasemad uuringud

Järgnevalt antakse ülevaade Kobras AS tööst „Jääkreostuste inventariseerimine 2014-2015. Kroodi oja reostunud põhjasetete reostusuuringu aruanne“, mis on vajalik, et selgitada Kroodi oja lõigus nr 3, 4 ja 5 asuva pinnase seisukorda. Reostusuuringu tulemused esitati Kroodi oja lõikude kaupa (vt joonis 4.1). Ülevaadet lõigust nr 1 ja 2 ei esitata, kuna seal on peamiseks reostuseks orgaaniline reostus ja käesolev töö käsitleb peamiselt raskmetallide reostust.

Kroodi oja keskjooksul (uuringulõik 3) on enamjaolt tegemist liivapinnastega. Oja sängis esineb orgaanilise aine sisaldusega ja kohati savikate vahekihtidega peenliiv. Oja kallastel esineb 10 cm paksune kõdu- ja mullakiht. Kõdu ja mulla all esines peenliiv, mis sisaldas osaliselt orgaanilist ainet ning seda läbiti 5,4 m ulatuses puuraugu PA-14 alal. Osaliselt on Kroodi oja keskjooksul oja läänekallast täidetud freesasfaltiga puuraukude PA-15 kuni PA-17 alal. Täitepinnase kihipaksus oli kuni 1,4 m, mille all esines looduslik peenliiv. Uuringulõigus nr 3 puuriti 17 puurauku ning võeti 37 pinnaseproovi, millest analüüsiti laboris 21 proovi. Kroodi oja keskjooksul ehk alumise tiigi ja loduala vahelisel alal võetud proovides pinnasereostust üle tööstusmaale kehtestatud piirarvude ei ilmnenu. [5]

Uuringulõigu nr 4 reljeefi on inimtegevuse käigus oluliselt ümber kujundatud. Oja läänekallast on ulatuslikult täidetud freesasfaldi ja saviga. Läänekaldal paiknev tootmisala oli uuringu ajal kaetud 1,65-2,50 m paksuse freesasfaldi kihiga puuraugu PA-22 ja PA-58 alal. Kohtades, kus freesasfalti ei olnud ning samuti ka freesasfaldi kihi all oli looduslik pinnas kaetud ümbertõstetud, konsistentsilt sitke kuni poolkõva sinisavi kihiga, mis algas 0,00-1,65 m sügavuselt. Savikihi paksus oli 0,10-4,30 m. Kohati esines ka segaminipööratud erineva koostise ja tihedusega täitepinnast. Täitepinnase kihipaksuseks mõõdeti 1,15-3,95 m. [5]



Joonis 4.1 Kroodi oja jaotumus lõikudena reostusuuringu põhjal.[8]

Idakaldal, oja vahetus läheduses, oli maapind kaetud 0,35-4,00 m paksuse täitepinnase kihiga, mis oli nii horisontaal- kui vertikaalsuunas erineva tiheduse ja koostisega. Täitepinnas koosnes lubjakivikillustikust, kambriumi sinisavi tükkidest, peenliivast, mudast ja mullast. Uuringu ajal täideti loduala idaosa reljeefilohke erineva täitematerjaliga.[5]

Looduslik kasvukiht oli puuraukude rajamise ajal säilinud peamiselt Kroodi oja kaldast kaugemale rajatud puuraukudes. Mullakihi paksus puuraukude alal oli 0,10-0,80 m. Oja kaldal leidis 0,10-0,50 m paksune turbamullakiht. Looduslikest pinnastest leidis oja kallaste vahetus läheduses orgaanilise aine sisaldusega peenliiva, mille kiht algas maapinnast 2,75-4,40 m sügavusel. Kihi paksus varieerus vahemikus 0,50 m kuni 3,10 m. Täitepinnase ja mõnel pool ka orgaanikaseguse peenliivakihi all lasus rauarikas, värvuselt veripunane või tumepunane peenliiv (vt joonis 4.2), mille puhul on tegemist tõenäoliselt tahke püriidi põletusjäätisega. Tumepunane peenliivakiht esines uuringulõigis hajusalt ning algas maapinnast 0,00-5,40 m sügavusel, kirjeldatud kihi paksus varieerus vahemikus 0,30 m kuni 3,40 m. [5]

Oja keskjooksu loduala jaotab kaheks Maardu linna Piiri tee teetamm. Piiri teest lõuna suunas jäävad eelnevalt kirjeldatud inimtegevusest tugevasti mõjutatud alad oja ida- ja läänekaldal. Piiri teest põhja suunas jääval lodualal on inimtegevuse jäljed väiksemad ning seal on enamjaolt tegemist looduslike pinnastega.[5]

Loduala põhjaosas puuritud aukudes esinesid liivapinnased, mida kattis taimejäänuste või mulla kiht ning selle kihi paksus oli maksimaalselt 10 cm. Orgaanikakihi all leidis värvuselt beeži, halli või tumepunast peenliiva (vt joonis 4.3). Tumepunase rauarikka peenliiva kiht esines hajusalt ning selle kihi paksus vähenes ojasängist eemale liikudes ja asendus halli või beeži liivaga. Kroodi oru nõlva kõrgemasse ossa puuritud puuraukudes uuringulõigis nr 4 esines helehall peenliiv, mida läbiti 5 m ulatuses.[5]



Joonis 4.2 Rauarikas tumepunane peenliiv (foto Kobras AS).

Uuringulõigis nr 4 puuriti 64 puurauku ja pinnaseproove võeti 183, millest analüüsiti laboris 123 proovi. Kroodi oja keskjooksu lodualal esines pinnasereostust raskmetallide ja arseeniga. Lodualal on kasutatud täitepinnaseks mitmesuguseid raskmetalle sisaldavaid tahkeid püriidi põletusjääke, mis varasemalt tekkisid väävelhappe tootmisprotsessis. Enamik lodualast oli erinevatel aegadel üleujutatud ja raskmetallidega reostunud pinnas on vooluvee poolt ümbersetitatud. Seetõttu on tänaseks enamik loduala katvast maapinnalähedasest peenliiva või muda kihist raskmetallide ja arseeniga reostunud (vt joonis 4.4). [5]



Joonis 4.3 Orgaanikakihi all leiduv peenliiv (autori foto).

Lodualalt võetud proovides ületas 58 proovis arseenisisaldus tööstusmaale kehtestatud piirarvu. Raskmetallidest, mis ületasid tööstusmaale kehtestatud piirarve, leiti tsinki, vaske, pliid ning kaadmiumi. Arseenisisaldus ületas tööstusmaale kehtestatud piirarvu kuni *ca* 18 korda. Raskmetallidest ületasid tööstusmaale kehtestatud piirarvu tsink kuni *ca* 7 korda, vask kuni *ca* 6 korda, plii kuni *ca* 3 korda ning kaadmium kuni *ca* 2 korda. Suurem osa reostusest paiknes kuni 4 m sügavusel, kuid üksikutes puuraukudes esines reostunud pinnast ka märksa sügavamalt võetud proovides.[5]

Uuringulõigis nr 5 voolab Kroodi oja kitsas ja madalas orus, mille nõlvad on alamjooksul mitmes kohas erineva tehnogeense pinnase ja olme- ning ehitusprahiga täidetud. Looduslikest pinnastest esineb alamjooksul peamiselt peenliivasid, kuid leidub ka kruusa ja savimõlli. [5]



Joonis 4.4 Raskmetallide ja arseeniga reostunud muda (foto Kobras AS).

Oja sāngi ja lammialale puuritud puuraukude andmetele tuginedes leidis alamjooksu lammialal kuni 0,20 m paksune kasvukiht. Kasvukihi all leidis kihilise tekstuuriga peenliiv, mis värvuselt oli beež, hall, pruun või tumepunane. Rauarikka ehk tumepunase peenliiva kiht esines hajusalt ning kihipaksus varieerus tugevalt, puududes mõnedes lõikudes ja kohati hõlmates kogu läbilõiget (vt joonis 4.5). [5]

Ojasāngis tumepunase peenliiva kiht puudus ning voolusāngis esines enamjaolt halli või beeži värvusega peenliiv, kuid mõnedes kohtades leidis ka õhukesi savi-, kruusa- ning savimõll pinnasekihte.[5]

Uuringulõigis nr 5 puuriti 65 puurauku ning võeti 107 pinnaseproovi, millest analüüsiti laboris 93 proovi. Oja alamjooksul alates keskjooksu lodualast kuni Muuga sadama territooriumini esines pinnases arseeni ja raskmetallide reostus kogu uurimislõigu ulatuses. Arseenisisaldus ületas tööstusmaale kehtestatud piirarvu kuni *ca* 14 korda. Raskmetallidest ületasid tööstusmaale kehtestatud piirarvu tsink kuni *ca* 6 , vask kuni *ca* 3 korda ning plii kuni *ca* 1,5 korda. Reostunud pinnasekihi paksus muutus uuringulõigu ulatuses, keskmine paksus oli 2,00 m ja reostus algas maapinnast. [5]



Joonis 4.5 Pinnase läbilõige uuringulõigus nr 5 (foto Kobras AS).

4.2. Varasemate uuringute andmete töötlus

Magistritöö käigus koguti kokku eelnevate uuringute andmed kolmelt uuringulõigult, milleks olid puuraukude asukohad, proovivõtu sügavused ning analüüsi tulemus. Tabelitest selgus, et mitte kõikides projektalal võetud puuraukudes esines raskmetallide reostust. Näiteks uuringulõigus number kolm võetud 21 proovist esines vaid kolmel juhul elumaa piirarve ületavaid pinnasereostuse näitajaid. Selle põhjal võib väita, et uuringulõigus number kolm on tegemist puhta pinnasega. Allavoolu liikudes olukord muutus. Uuringulõigus nr 4 esines tööstusmaa piirarvude ületamist mitmete raskmetallide puhul. Nende suurimad leidunud kontsentratsioonid uuringulõigus olid arseeni puhul 906 mg/kg KA ning tsingi puhul 7200 mg/kg KA. Laboris on analüüsitud 123 proovi uuringulõigust nr 4 ning neist 58 proovis leidis arseeni rohkem kui tööstusmaal piirarvuga on lubatud. 71 proovis ületas reostus elumaa piirarvu, kuid arseeni tuvastati kõikides proovides. Tsinki suures osas proovides ei uuritud, kuid 44 proovis, kus tsinki määrati, oli 28 analüüsi tulemus reostuse suhtes tööstusmaa piirarvu ületav ning 29 proovi puhul tuvastati elumaa piirarvu ületav väärtus. Ülejäänud proovides oli tsingi kontsentratsioon väiksem. Uuringulõigus nr 5 oli suurim arseenisaldus võetud pinnaseproovis 390 mg/kg KA ning suurim tsingisisaldus oli 5648 mg/kg KA. Kõigist 93 võetud proovist leiti arseeni, kuid tööstusmaa piirarvu ületavaid

kontsentratsioone registreeriti 48 juhul ning elamumaa piirväärtust ületas arseen 62 proovis. Tsinki uuriti 69 proovis, millest 17 juhul ületas analüüsitulem tööstusmaa piirarvu ning 39 juhul ületas tulem elamumaa piirväärtust. Ülejäänud proovides ei ületanud tsingi kogus piirväärtusi. Uuringutest selgus, et projektalal kõige suuremale alale levinud reostus on põhjustatud arseeni poolt.

4.3. Reostusandmete graafiline analüüs

Varasemate uuringute käigus tehtud pinnaseuuringute ja laboratoorsete katsete põhjal sooritati graafiline analüüs. Selleks oli vaja koostada tabel, kus on välja toodud kõikide arseeni sisaldanud puuraukude mõõtmiste tulemused (vt tabel 3). Tabelis on välja toodud erinevate puuraugukihtide arseenisisaldused, kuid joonis koostati vaid kõige suuremate mõõdetud kontsentratsioonide põhjal. Tabelis on joonisel kasutatud väärtused märgitud värvilise taustaga. Programmiga AutoCad Civil 3D koostati arseenireostuse kontsentratsioonide jaotumuse kaart, millelt on näha, et ajalooliselt on raskmetallidega reostunud vedelikke/pinnaseid Kroodi oja ladestatud ilmselt kahes kohas (vt joonis 1). Seda kinnitab ka ajaloolistelt kaartidelt nähtav fakt, et nendes asukohtadesse viis varasemalt tehase juurest ka raudtee. Nendes kohtades on raskmetallide sisaldus võrreldes ümbritsevatest puuraukudest võetud tulemustega kõige suurem ning joonisele toetudes võib väita, et reostus on kahest reostuskoldest vooluga mööda Kroodi oja alamjooksu poole edasi kandunud. Suurim reostuse osa on hoolimata reostuse levikust allavoolu kogunenud algsetesse reostuskolletesse. Reostuskoldest nr 1 on hakanud reostus liikuma allavoolu, ning on hästi näha, kuidas truubi nr 1 juures voolu kiiruse vähenedes on reostus settinud ning jäänud sinna püsima, reostades sellega ka olemasoleva pinnase. Reostuskolle nr 2, mis asub Piiri teest allavoolu, on näha, et reostus on hakanud levima alavoolu koos veega, kuid reostuskoldest allavoolu pole pinnases leitavad arseenisisaldused nii suured kui reostuskoldes endas ning allavoolu liikudes väheneb arseenisisaldus pinnases, mis tähendab, et arseen on settinud voolusängi ning selle kallastesse ühtlaselt. Veel üks reostunumaid kohti asub allavoolu liikudes vahetult peale truupi 2 (vt joonis 1), kus on samuti toimunud voolukiiruse vähenemine. Voolukiirus väheneb voolukanali ristlõike suurenemise tõttu. Selles asukohas viitab vooluga kandunud reostusele asjaolu, et reostunud pinnast pole paksult, vaid voolukanali põhjast mõõtes 0,5 m.

Tabel 3. Joonise nr 1 koostamiseks kasutatud andmed

Puuraugu tähis	Proovi tüüp	Sügavus (m)	Näitaja	Väärtus	Ühik
Pa-110	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	36,3	mg/kg KA
Pa-110	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	39,4	mg/kg KA
Pa-17	Pinnas	2,40-3,00	Arseen	42,2	mg/kg KA
Pa-51	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	73,0	mg/kg KA
Pa-51	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	39,8	mg/kg KA
Pa-75	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	355,0	mg/kg KA
Pa-53	Pinnas	1,80-2,30	Arseen	231,0	mg/kg KA
Pa-53	Pinnas	2,30-2,80	Arseen	389,0	mg/kg KA
Pa-18	Pinnas	3,50-4,00	Arseen	906,0	mg/kg KA
Pa-52	Pinnas	5,00-5,90	Arseen	82,8	mg/kg KA
Pa-52	Pinnas	6,50-6,80	Arseen	114,0	mg/kg KA
Pa-74	Pinnas	0,00-2,00	Arseen	500,0	mg/kg KA
Pa-74	Pinnas	2,50-3,20	Arseen	137,0	mg/kg KA
Pa-19	Pinnas	4,00-4,50	Arseen	91,0	mg/kg KA
Pa-39	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	102,0	mg/kg KA
Pa-39	Pinnas	0,80-1,00	Arseen	345,0	mg/kg KA
Pa-39	Pinnas	1,00-1,50	Arseen	381,0	mg/kg KA
Pa-61	Pinnas	2,40-2,60	Arseen	204,0	mg/kg KA
Pa-61	Pinnas	4,15-4,95	Arseen	45,4	mg/kg KA
Pa-61	Pinnas	6,20-6,40	Arseen	153,0	mg/kg KA
Pa-61	Pinnas	7,45-8,45	Arseen	77,9	mg/kg KA
Pa-20	Pinnas	3,90-4,50	Arseen	307,0	mg/kg KA
Pa-20	Pinnas	5,50-6,00	Arseen	161,0	mg/kg KA
Pa-40	Pinnas	0,00-0,40	Arseen	825,0	mg/kg KA
Pa-40	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	228,0	mg/kg KA
Pa-40	Pinnas	1,00-1,50	Arseen	57,5	mg/kg KA
Pa-24	Pinnas	4,30-4,80	Arseen	56,0	mg/kg KA
Pa-60	Pinnas	2,60-2,80	Arseen	63,2	mg/kg KA
Pa-22	Pinnas	2,95-3,25	Arseen	34,5	mg/kg KA
Pa-42	Pinnas	0,00-0,40	Arseen	712,0	mg/kg KA
Pa-42	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	36,9	mg/kg KA
Pa-42	Pinnas	1,00-1,50	Arseen	38,0	mg/kg KA
Pa-23	Pinnas	3,00-3,50	Arseen	49,5	mg/kg KA
Pa-23	Pinnas	6,50-7,50	Arseen	34,2	mg/kg KA
Pa-21	Pinnas	3,50-4,00	Arseen	182,0	mg/kg KA
Pa-41	Pinnas	0,00-0,40	Arseen	92,3	mg/kg KA
Pa-41	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	112,0	mg/kg KA
Pa-41	Pinnas	1,00-1,50	Arseen	222,0	mg/kg KA
Pa-102	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	93,0	mg/kg KA
Pa-102	Pinnas	1,20-1,40	Arseen	422,0	mg/kg KA
Pa-101	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	205,0	mg/kg KA

Puuraugu tähis	Proovi tüüp	Sügavus (m)	Näitaja	Väärtus	Ühik
Pa-101	Pinnas	1,50-2,00	Arseen	147,0	mg/kg KA
Pa-103	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	42,8	mg/kg KA
Pa-103	Pinnas	0,75-1,00	Arseen	74,0	mg/kg KA
Pa-50	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	277,0	mg/kg KA
Pa-50	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	74,5	mg/kg KA
Pa-50	Pinnas	1,15-1,50	Arseen	120,0	mg/kg KA
Pa-196	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	35,8	mg/kg KA
Pa-116	Pinnas	0,00-0,40	Arseen	209,0	mg/kg KA
Pa-116	Pinnas	0,60-1,00	Arseen	225,0	mg/kg KA
Pa-197	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	302,0	mg/kg KA
Pa-104	Pinnas	0,00-0,30	Arseen	90,0	mg/kg KA
Pa-104	Pinnas	0,50-0,80	Arseen	152,0	mg/kg KA
Pa-104	Pinnas	1,30-1,50	Arseen	41,5	mg/kg KA
Pa-205	Pinnas	2,60-3,00	Arseen	196,0	mg/kg KA
Pa-205	Pinnas	4,00-5,00	Arseen	88,0	mg/kg KA
Pa-115	Pinnas	0,00-0,40	Arseen	162,0	mg/kg KA
Pa-202	Pinnas	0,10-0,50	Arseen	45,5	mg/kg KA
Pa-113	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	243,0	mg/kg KA
Pa-114	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	483,0	mg/kg KA
Pa-114	Pinnas	0,60-0,90	Arseen	49,9	mg/kg KA
Pa-114	Pinnas	1,00-1,50	Arseen	330,0	mg/kg KA
Pa-208	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	780,0	mg/kg KA
Pa-206	Pinnas	1,05-1,25	Arseen	243,0	mg/kg KA
Pa-206	Pinnas	1,25-2,00	Arseen	80,9	mg/kg KA
Pa-198	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	207,0	mg/kg KA
Pa-119	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	183,0	mg/kg KA
Pa-119	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	96,0	mg/kg KA
Pa-120	Pinnas	0,10-1,00	Arseen	440,0	mg/kg KA
Pa-207	Pinnas	0,10-1,00	Arseen	458,0	mg/kg KA
Pa-207	Pinnas	2,00-3,00	Arseen	50,5	mg/kg KA
Pa-207	Pinnas	3,00-4,00	Arseen	47,2	mg/kg KA
Pa-118	Pinnas	0,10-1,00	Arseen	439,0	mg/kg KA
Pa-117	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	254,0	mg/kg KA
Pa-26	Pinnas	3,95-4,20	Arseen	43,6	mg/kg KA
Pa-26	Pinnas	6,00-6,50	Arseen	177,0	mg/kg KA
Pa-44	Pinnas	0,20-0,50	Arseen	712,0	mg/kg KA
Pa-44	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	136,0	mg/kg KA
Pa-44	Pinnas	1,20-1,50	Arseen	439,0	mg/kg KA
Pa-45	Pinnas	0,20-0,50	Arseen	346,0	mg/kg KA
Pa-45	Pinnas	0,70-1,00	Arseen	108,0	mg/kg KA
Pa-214	Pinnas	0,40-0,75	Arseen	80,0	mg/kg KA
Pa-126	Pinnas	0,40-1,00	Arseen	655,0	mg/kg KA
Pa-216	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	390,0	mg/kg KA
Pa-215	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	30,7	mg/kg KA

Puuraugu tähis	Proovi tüüp	Sügavus (m)	Näitaja	Väärtus	Ühik
Pa-124	Pinnas	0,75-1,10	Arseen	65,0	mg/kg KA
Pa-128	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	32,1	mg/kg KA
Pa-128	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	136,0	mg/kg KA
Pa-129	Pinnas	0,30-1,00	Arseen	256,0	mg/kg KA
Pa-127	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	36,0	mg/kg KA
Pa-210	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	107,0	mg/kg KA
Pa-209	Pinnas	0,25-1,00	Arseen	224,0	mg/kg KA
Pa-211	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	222,0	mg/kg KA
Pa-122	Pinnas	0,00-0,25	Arseen	128,0	mg/kg KA
Pa-122	Pinnas	0,25-0,50	Arseen	83,0	mg/kg KA
Pa-132	Pinnas	0,15-1,00	Arseen	56,0	mg/kg KA
Pa-48	Pinnas	0,20-0,50	Arseen	106,0	mg/kg KA
Pa-48	Pinnas	1,00-1,50	Arseen	132,0	mg/kg KA
Pa-130	Pinnas	0,10-1,00	Arseen	42,7	mg/kg KA
Pa-47	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	105,0	mg/kg KA
Pa-133	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	44,4	mg/kg KA
Pa-131	Pinnas	0,15-1,00	Arseen	54,9	mg/kg KA
Pa-183	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	97,5	mg/kg KA
Pa-183	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	83,0	mg/kg KA
Pa-136	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	177,0	mg/kg KA
Pa-135	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	316,0	mg/kg KA
Pa-134	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	101,0	mg/kg KA
Pa-137	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	91,5	mg/kg KA
Pa-139	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	95,6	mg/kg KA
Pa-140	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	56,5	mg/kg KA
Pa-49	Pinnas	0,80-1,00	Arseen	43,6	mg/kg KA
Pa-141	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	58,5	mg/kg KA
Pa-142	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	66,0	mg/kg KA
Pa-146	Pinnas	0,10-1,00	Arseen	34,6	mg/kg KA
Pa-145	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	88,7	mg/kg KA
Pa-144	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	83,0	mg/kg KA
Pa-143	Pinnas	0,20-1,00	Arseen	85,3	mg/kg KA
Pa-46	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	69,7	mg/kg KA
Pa-149	Pinnas	0,00-0,70	Arseen	56,9	mg/kg KA
Pa-149	Pinnas	0,70-1,00	Arseen	192,0	mg/kg KA
Pa-148	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	87,0	mg/kg KA
Pa-148	Pinnas	0,50-0,75	Arseen	94,2	mg/kg KA
Pa-185	Pinnas	0,30-0,50	Arseen	272,0	mg/kg KA
Pa-185	Pinnas	1,20-1,50	Arseen	45,7	mg/kg KA
Pa-184	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	97,6	mg/kg KA
Pa-187	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	208,0	mg/kg KA
Pa-188	Pinnas	0,00-0,40	Arseen	48,4	mg/kg KA
Pa-188	Pinnas	0,50-0,70	Arseen	42,5	mg/kg KA
Pa-188	Pinnas	0,70-1,00	Arseen	40,1	mg/kg KA

Puuraugu tähis	Proovi tüüp	Sügavus (m)	Näitaja	Väärtus	Ühik
Pa-191	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	38,5	mg/kg KA
Pa-191	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	44,2	mg/kg KA
Pa-192	Pinnas	0,00-1,00	Arseen	155,0	mg/kg KA
Pa-194	Pinnas	0,00-0,50	Arseen	85,0	mg/kg KA
Pa-194	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	69,0	mg/kg KA
Pa-195	Pinnas	0,50-1,00	Arseen	80,0	mg/kg KA
Pa-193	Pinnas	0,00-0,40	Arseen	66,5	mg/kg KA
Sihtarv				20	mg/kg KA
Piirarv elamumaal				30	mg/kg KA
Piirarv tööstusmaal				50	mg/kg KA
Sihtarv näitab ohtliku aine sellist sisaldust pinnases, millega võrdse või väiksema väärtuse korral loetakse pinnase seisund heaks. Piirarv näitab ohtliku aine sellist sisaldust pinnases, millest suurema väärtuse korral loetakse pinnas reostunuks (keskkonnaministri 11.08.2010. a määrus nr 38).					

Vertikaalsuunalise reostuse leviku näitamiseks koostati ristlõiked, mis on kümnekordselt vertikaalselt suurendatud, et joonis oleks paremini loetav ning millel kujutatakse reostuse võimalikku ladestumist voolusängis ja selle ümbruses. Alustades reostuskoldest nr 1 ja liikudes edasi allavoolu, tehti 5 ristlõiget tuginedes varasemate uuringute andmetele. Ristlõigetel on erinevate kontsentratsioonidega reostatud pinnas märgistatud erineva värviga. Värvid valiti järgnevalt: mida heledam värv, seda puhtam pinnas ja vastupidi. Vahemikud valiti järgnevalt: kuni elamumaa piirarvuni (30 mg/kg KA) arseenisisaldusega pinnas on puhas, tööstusmaa piirarvule (50 mg/kg KA) vastav pinnas on reostunud, kuid võib olla kasutamiseks, ning järgmised vahemikud 50-200 (mg/kg KA) on tugevalt reostunud ning 200-906 (mg/kg KA) väga tugevalt reostunud pinnas.

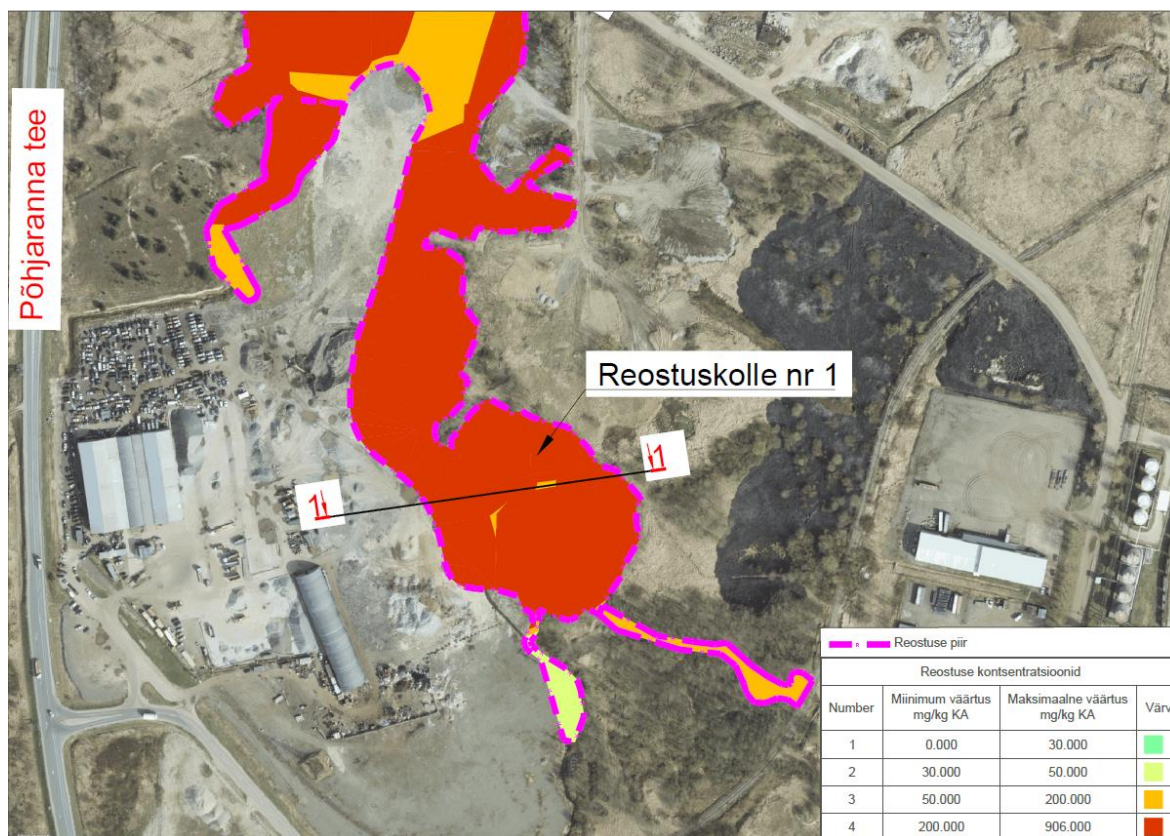
Peale Maardu järve taastamist asuti järve varasemalt purunenud paisu vee poolt tekitatud orgu täitma. Oru täiteks kasutati algselt erinevaid täitepinnaseid, kuid hakati kasutama ka arseenirikkaid püriidipõletusjääke. Ajaloolistelt kaartidelt on näha kaks raudteelõiku, mis on rajatud fosforiidi rikastustehase juurest Kroodi oja oru kohtadesse, kus tänapäeval esineb kõige suurem reostus. Sellest võib järeldada, et sel viisil on reostust oja orgu ladestatud.

Ristlõige nr 1 (vt joonis 2) läbib reostuskollet nr 1 (vt joonis 4.6). Ristlõikel on uuritud pinnast 9,3 meetri sügavuseni, puhta pinnaseni jõuti 8,2 meetri sügavusel. Ristlõike paremas servas on näha, et oja sängist väljaspool on tegemist puhta pinnasega, mis näitab, et reostust on varasemalt ladestatud ojja kas vedelal või tahkel kujul. Hästi on näha reostuse kihistumine vertikaalsuunaliselt. Kihid on tekkinud ladestamise teel ning sügavamale on imunud

reostus vähesel määral leostumise teel. Varasemalt oli oja sāngi ũmbritsev lammiala kaetud veega ning nii levis ka orgu transporditud reostus horisontaalselt. Ristlõikelt on nāha, kuidas joonise paremas osas lābib vāga reostunud pinnast vāhem reostunud pinnasekiht. See vōib olla tingitud leostumisest. Samuti on nāha, et ajalooliselt on oja voolanud ilmselt kahes kohas ning mōlema ũmbruses on pinnas reostunud. Joonise vasakus servas, kus reostunud pinnase peal on puhas pinnas, on tingitud pinnase puhtus sellest, et pidevalt on veetud Kroodi oja kallastele pinnast juurde. Vāga suur osa Kroodi oja kaldast on tāidetud ning seetōttu on mitmetes kohtades reostunud pinnas kaetud puhta pinnasega.

Ristlõige nr 2 (vt joonis 3) lābib reostuskollet nr 2 (vt joonis 4.7). Ristlõikel asuvatest puuraukudest kōige sūgavam rajati 5 m sūgavuseni. Jooniselt nāhtub, et pōhiline reostus on voolusāngi ũmber, ning sellel oja lõigul on neid kaks. Peamise voolukanali ũmber pole reostuse kontsentratsioon pinnases nii suur kui Kroodi ojja suubuva kraavi ũmber olev reostus. Samuti nāhtub, et reostus on kihistunud, mis viitab sellele, et ajalooliselt on vōinud toimuda saasteainete ladestamine piirkonda erinevatel aegadel ehk algselt on ladestatud saasteaineid, mille jārel on vesi osa saasteainetest allavoolu uhtunud, peale mida on alanud uuesti saasteainete transport alale. Kuna tegu oli varasemalt ũmbritsevast pinnast madalama alaga, siis, nagu ka jooniselt nāhtub, on ristlõike vasakul poolel puhta pinnasega kaetud ũhtlaselt reostunud pinnas, mis tuleneb ka sellel lõigul uue puhta pinnase reostusele vedamisest.

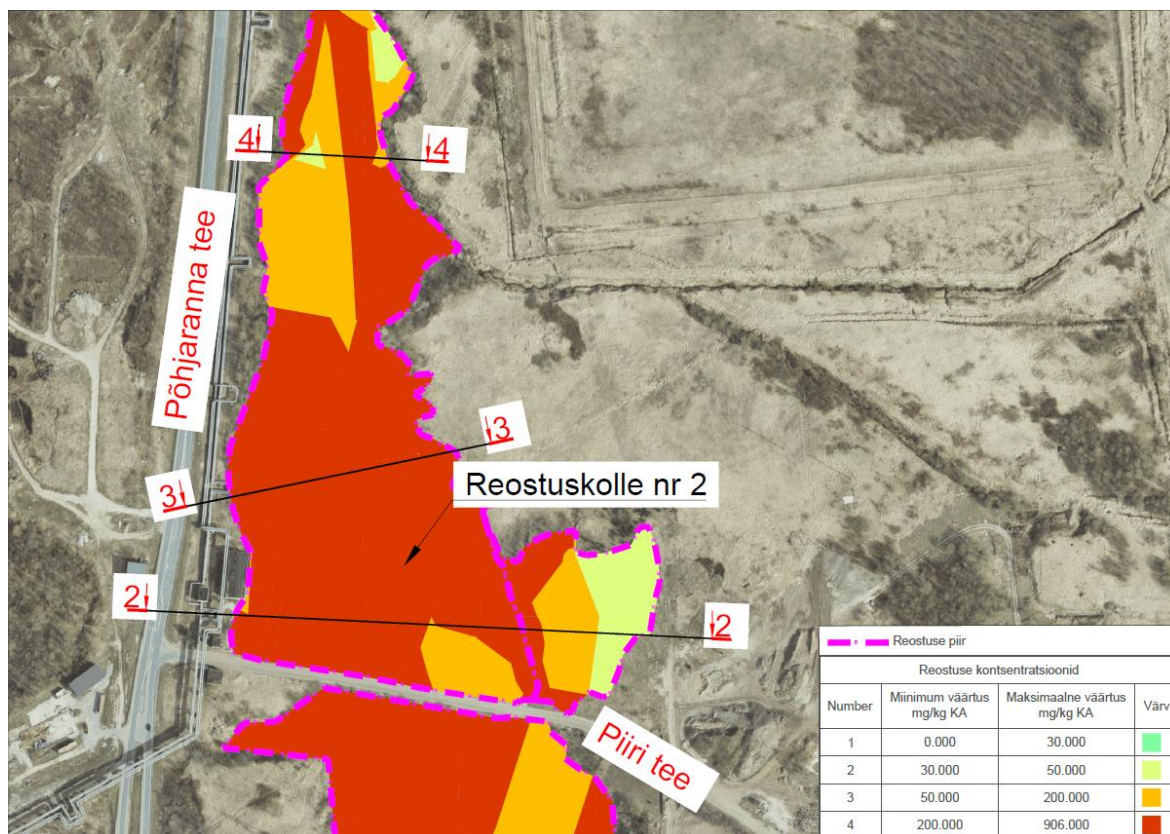
Ristlõige nr 3 (vt joonis 4) asub samuti reostuskoldes nr 2 (vt joonis 4.7), kuid veidi allavoolu. Sellel ristlõikel on hāsti nāha, kuidas reostus on kihistunud. Varasemalt alale toodud saasteained on sūgavamal pinnases ning nende kontsentratsioon on vāiksem kui pinnale lāhemal asuvad reoained. Sellel ristlõikel ulatub reostus laial alal maapinnani. Samuti on nāha, et ristlõike keskosas sūgaval pinnases on nō „pesa“, kus on puhtam pinnas kui seda ũmbritsev pinnas. Oja vasakpoolse kalda ristlõiget vaadates on nāha, et reostunud pinnase peal asub vāike kiht puhas pinnast, mis koosneb huumusest.



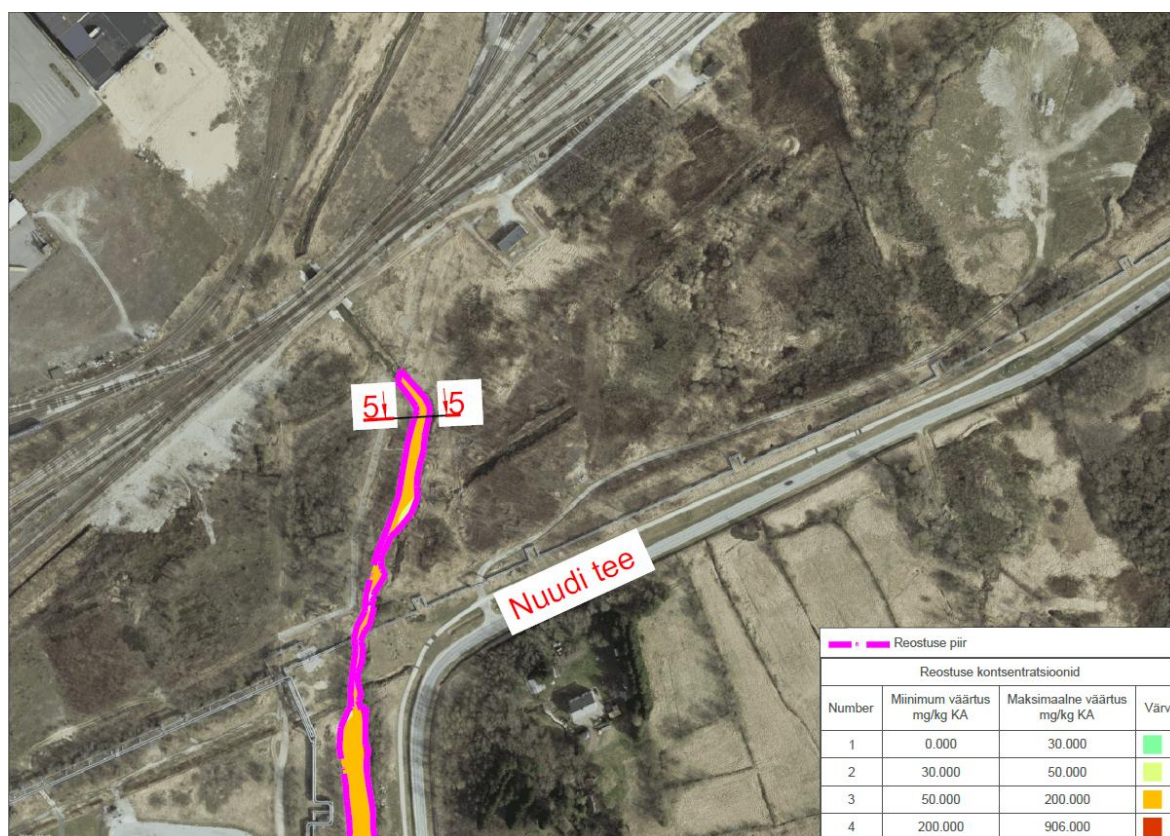
Joonis 4.6 Ristlõike nr 1 asukoht.

Ristlõige nr 4 (vt joonis 5) asub reostuskolde nr 2 lõpus (vt joonis 4.7). Sellel ristlõikel on näha, et kõrgema reostusega pinnas asub sügavamal ja pealpool on vähem reostunud pinnas. Sellest võib järeldada, et alguses, kui reostust hakati oja orgu transportima kahte eelpool mainitud kohta, kandus reostus ka allavoolu, kuid mida aeg edasi, seda vähem reoaineid on vooluga kaasa liikunud ja sellest tulenevalt on ka pinnasekihid rohkem reostunud ja vähem reostunud, kuid peamine reostus on jäänud püsima kohtadesse, kust ajalooliselt on reoaineid Kroodi oja ladustatud.

Ristlõige nr 5 (vt joonis 6) asub Kroodi oja alamjooksul vahetult enne raudteed (vt joonis 4.8). Joonisel on näha, et ka sellel lõigul on osa reostusest kaetud puhta pinnasega ning reostus paikneb põhiliselt oja sāngi ümbruses. Sellesse lõiku on reostus ilmselt kandunud ojas ülevalpool olevatest reostuskolletest ning settinud aastate jooksul.



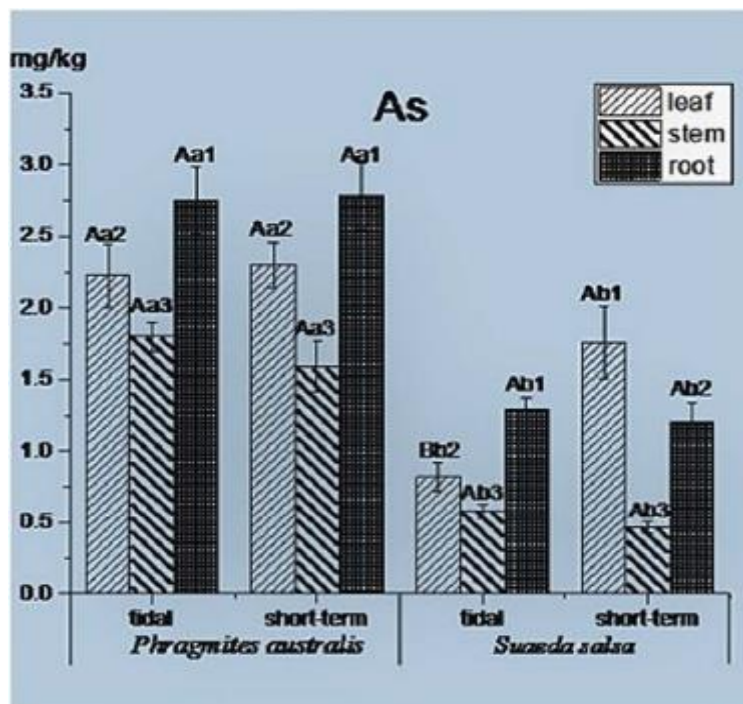
Joonis 4.7 Ristlõike nr 2, 3, 4 asukoht.



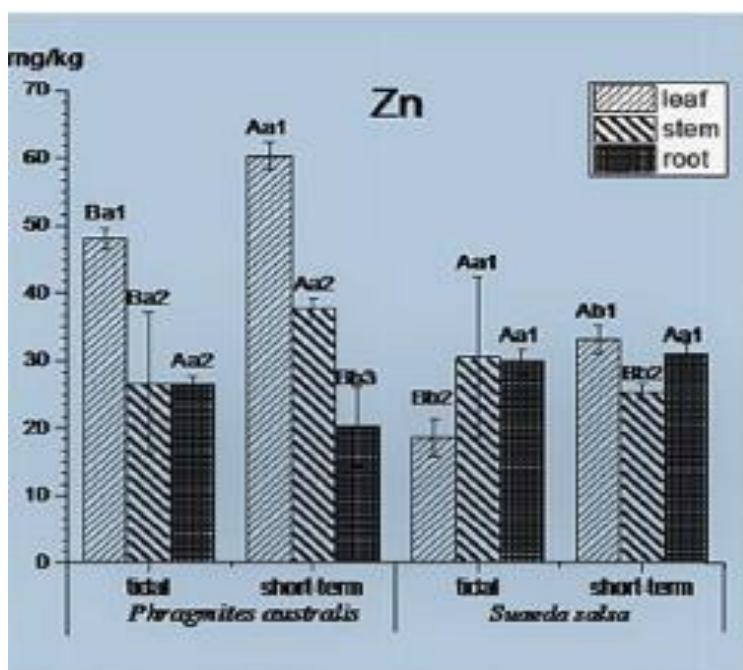
Joonis 4.8 Ristlõike nr 5 asukoht.

4.4. As ja Zn omastamine hariliku pilliroo poolt

Kirjanduse andmetel on fosfor üks olulisemaid aineid taimedes ning arseen on temaga väga sarnane. Fosfor imendub taime juurtoitumise teel ning samuti ka arseen. See sarnasus näib olevat peamine põhjus taimede võimele arseeni pinnasest omastada.[22] Hiinas Kollase jõe deltas teostatud uuring näitas, et taimeosadest akumulereb kõige rohkem arseeni hariliku pilliroo (*phragmites australis*) juur, juurele järgneb leht ja siis vars. Juures oli akumulereitud arseeni kogus tõusu mõjualal ning samuti ka lühiajalise üleujutusega aladel 2,75 mg/kg. Tõusu poolt mõjutatud alal oli lehte kogunenud arseeni 2,24 mg/kg ja lühiajaliselt üleujutatud alal 2,26 mg/kg. Kõige vähem arseeni leidis vartes, milles leiti üleujutuse poolt mõjutatud alal 1,76 mg/kg ning lühiajaliselt üleujutatud alal 1,57 mg/kg (vt joonis 4.9). Sama uuringu käigus uuriti ka tsingi omastamist sama taime poolt, mis näitas, et taimel toimub tsingi akumulereimine arseenist erinevalt. Nimelt omastab antud uuringu põhjal harilik pilliroog tsinki suuremas koguses kui arseeni ning kannab seda ka juurest lehtedesse ja varde paremini kui arseeni. Kõige suurem tsingi väärtus taimel oli lühiajalise üleujutuse poolt mõjutatud alal, kus tsinki oli taimelehes 60 mg/kg ning tõusu poolt mõjutatud alal oli tsinki taimelehes 48 mg/kg. Varres oli tsinki lühiajalise üleujutusega alal 37 mg/kg ning tõusu poolt mõjutatud alal ühtlustus varres ja juures leiduv tsink 26 mg/kg juures. Lühiajalise üleujutusega alal oli tsinki 20 mg/kg (vt joonis 4.10).[23]



Joonis 4.9 Hariliku pilliroo ja soolak-soodaheina poolt omastatud arseen Kollase jõe deltas[23]



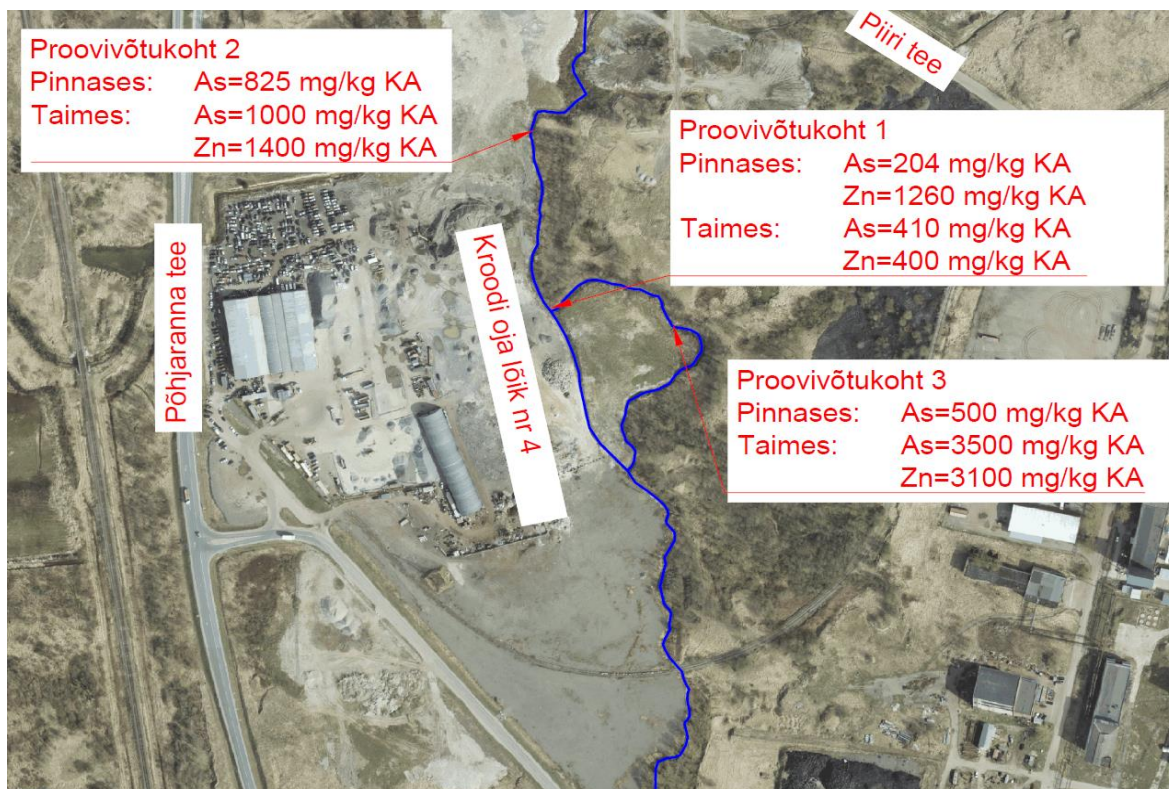
Joonis 4.10 Hariliku pilliroo ja soolak-soodaheina poolt omastatud tsink Kollase jõe deltas[23]

4.5. Keemiliste elementide sisalduse uuring

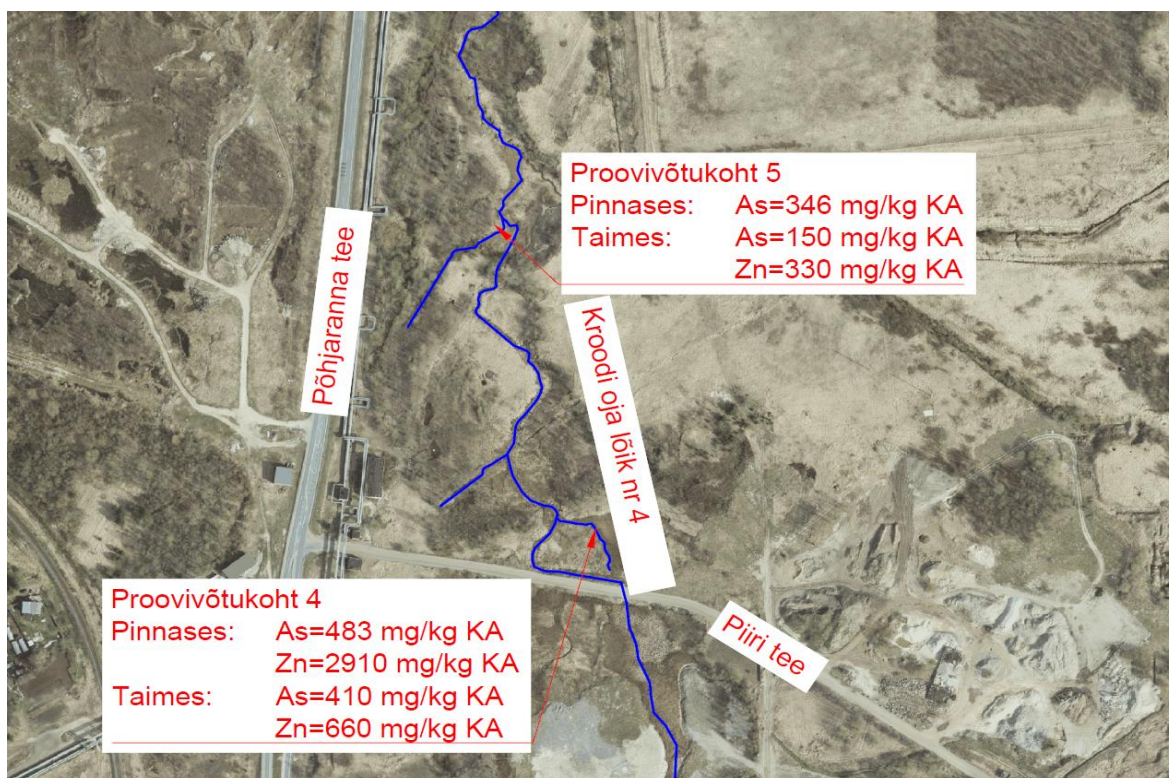
Magistritöö käigus uuriti, kas taimedes leidub arseeni ja tsinki, mida leidub Kroodi oja sängis ja kallastel. Eesmärgiks oli välja selgitada, kas oja kaldal kasvavad taimed omastavad toitumise käigus arseeni ning samuti ka tsinki. Kuna reostunud pinnases on varasemalt läbi viidud leostumiskatsed, kontrolliti taimedega tehtud katsetega, kas ka reaalselt kujutavad pinnases olevad raskmetallid inimestele ja loomadele ohtu. Selleks koostati reostuse levikut iseloomustav joonis (vt joonis nr 1), millest lähtudes valiti punktid, kust võtta taimedest proovid (vt joonis 4.11, 4.12). Proovivõtupunktide valikul lähtuti eelnevalt tehtud uuringutest ning valiti asukohad, kus pinnases oli kõrge arseenisisaldus ja reostunud pinnase kiht asus maapinnal või selle läheduses. Kuna taimed ei suuda oma juuri sügavale pinnasesse kasvatada (hariliku pilliroo juured kasvavad maksimaalselt 35 cm sügavusele [24]), oli oluline, et proovivõtukohas asuks reostunud pinnase kiht maapinnal või selle läheduses. Samuti oli üheks proovivõtu parameetrik oja reostuskollete asukoht. Kõik proovid võeti katselõigust nr 4. Proovide nummerdamine voolusuunaliselt on 3, 1, 2, 4, 5. Esimesed proovid võeti oja keskjooksu ülemisest osast, kus asub ka reostuskolle nr 1 ja edasi liiguti mööda oja alamjooksu poole, et vaadata, kas reostuskoldest allapoole liikudes arseeni sisaldus taimedes muutub. Seda selleks, et näha, kas pinnases oleva arseeni hulk mõjutab arseeni omastamist positiivselt või negatiivselt. Taimeks, millest proovid 1-5 võeti, oli harilik pilliroog (*phragmites australis*).

Harilik pilliroog on mitmeaastane ühekojaline rohhtaim, mis kasvab vees ja liigniisketel aladel. Tema risoom on kuni 3 cm jämedune, pikk ja rohkete narmasjuurtega. Peamiselt paljuneb pilliroog vegetatiivselt risoomi ja juurduvate maapealsete varte abil. Noort pilliroogu kasutatakse veistele ja hobustele ka söödataimena.[25]

Proovitaimed 1-5 kaevati koos risoomiga oja kaldalt, vahetult vee piirilt, märgistati ja viidi Eesti Keskkonnauuringute Keskuse laborisse edasiseks uurimiseks ICP-MS meetodil. Eelnevale kirjanduse uuringule tuginedes otsustati, et proov võetakse taime risoomist, kuna *phragmites australis* omastab raskmetalli paremini risoomis, kuid kannab seda edasi ka varde ja lehtedesse. Uuring näitas, et harilik pilliroog omastab risoomiga märkimisväärse koguse tsinki ja arseeni (vt tabel 4).



Joonis 4.11 Proovivõtukohta nr 1, 2, 3 asukohad looduses.



Joonis 4.12 Proovivõtukohta nr 4, 5 asukohad looduses.

Katse tulemusest nähtub, et harilik pilliroog (*phragmites australis*) omastab arseeni ja tsinki hästi, kuid kuna proovid võeti loodusest, on prooviks võetud taimi omavahel raske hinnata. Teada on, et reostus on alal olnud juba kümneid aastaid, kuid pilliroog, millest proovid võeti, võib olla erineva vanusega. Tabelile nr 4 tuginedes võib öelda, et pilliroog akumuleerib raskmetalle ja seega on ohtlik ka loomadele ja inimestele. Täpsemalt oleks võimalik pilliroo arseeni ja tsingi akumuleerimisvõimet hinnata uue katse käigus, kus võetakse näiteks Kroodi oja kaldalt erineva arseeni ja tsingi sisaldusega pinnast ning istutatakse sellesse pinnasesse pilliroo taimed. Taimede kasvades saaks võtta proovid nii risoomist kui ka vartest ja lehtedest ning nii oleks võimalik paremini hinnata pilliroo võimekust akumuleerida raskmetalle. Nii toimides oleks võimalik täpselt hinnata pilliroo võimet akumuleerida vastavaid raskmetalle.

Tabel 4. Taimede arseenisisalduse katse tulemused

Proovi nr	As taimes (mg/kg KA)	Zn taimes (mg/kg KA)	As pinnases (mg/kg KA)	Zn pinnases (mg/kg KA)
1	410	400	204	1260
2	1000	1400	825	Pole analüüsitud
3	3500	3100	500	Pole analüüsitud
4	410	660	483	2910
5	150	330	346	Pole analüüsitud
Sihtarv			20	200
Piirarv elamumaal			30	500
Piirarv tööstusmaal			50	1000
Sihtarv näitab ohtliku aine sellist sisaldust pinnases, millega võrdse või väiksema väärtuse korral loetakse pinnase seisund heaks. Piirarv näitab ohtliku aine sellist sisaldust pinnases, millest suurema väärtuse korral loetakse pinnas reostunuks (keskkonnaministri 11.08.2010. a määrus nr 38).				

4.5.1. ICP-MS meetod

Laboris uuriti taimseid proove ICP-MS meetodil. Induktiivsidestunud plasma massispektromeetria (ICP-MS) on analüütiline meetod, mida kasutatakse elementide määramiseks. See tehnika võeti laiemalt kasutusele aastal 1983 ja sai heakskiidu erinevatelt laboritelt. Esimesed, kes hakkasid seda meetodit rohkem kasutama, olid geokeemilisi uuringuid tegevad laborid, sest see tehnika suudab väga hästi määrata haruldasi muldmetalle. ICP-MSis on kombineeritud kõrge temperatuuri tekitamine ja massispektromeetria. Plasmatöötlusega teisendatakse elemendi aatomid proovis ioonideks, mis eraldatakse üksteisest ja mille olemus määratakse seejärel massispektromeetriga.[26]

Proovid sisestatakse üldiselt ICP plasmasse aerosoolina kas imedes vedelikku või lahustunud tahkise proovi nebulisaatorisse või kasutades tahkete proovide aerosooliks muutmiseks laserit. Kui aerosooliks muudetud proovid sisestatakse seadmesse, siis proovid lagunevad täielikult ja elemendid aerosoolis muudetakse kõigepealt gaasilisteks aatomiteks ning seejärel ioniseeritakse plasma lõpus. Seejärel suunatakse ioonid massispektromeetrisse. Spektromeetris eraldatakse ioonid nende massi ja laengu suhte järgi ning sellega määratakse proovis leidunud ained. [26]

5. VALITUKS OSUTUNUD OHUTUSTAMISE VIIS

Kroodi oja reostus on peamiselt raskmetallide poolt põhjustatud ning need pole hästi leostuvad. Kuna tegu on põhjavee väljavoolualaga, on varasemate uuringute ja tööde põhjal otsustatud, et kõige optimaalsem oleks käesoleval ajal rahalisi võimalusi ja keskkonna mõju arvestades reostuse isoleerimine. Kogu reostuse maht alal on *ca* 523 600 kuupmeetrit. Kuna nii uuringulõik nr 4 kui ka 5 on raskmetallide poolt reostatud, oleks mõistlik need isoleerida ühes kohas. Seega, kuna peamine reostuskolde asub uuringulõigis nr 4 ja allavoolu asuvas lõigis 5, on eelnevate uuringute põhjal mahu poolest reostust palju vähem, kaevatakse uuringulõigis nr 5 reostunud pinnas välja ja transporditakse reostuskolde peale jõe keskjooksul. Kui alamjooksult on reostus välja kaevatud ning transporditud keskjooksul asuva reostuskolde peale, tuleb reostus ohutustada nii, et see ei põhjustaks enam ohtu ümbritsevale keskkonnale. Kroodi oja lõigis nr 2 asub ka kaks tiiki, mis pole reostunud raskmetallidega, kuid seal leidub orgaanilist reostust. Kuna ka see osa ojast on vaja ohutustada, siis valiti tehnoloogiaks terminaalne töötlus, mis kujutab endast pinnase põletamist, mille käigus põlevad ära orgaanilised reoained ning edasi transporditakse juba puhastatud pinnas oja keskjooksul asuva reostuskolde peale, kus reostus kaetakse puhastatud pinnasega ühtlaselt ning nii reostatud pinnasest kui ka sinna veetud juba töödeldud pinnasest kujundatakse mägi. Kui kõik reoained on koondatud ühte asukohta, kaetakse reostuskolde kattekihiga, mis koosneb isoleerivast kihist ning kasvukihist. Isoleeriva kihi eesmärk on takistada sademevee imbumist pinnasesse ja see koosneb savikast halvasti vett juhtivast materjalist. Lisaks veepidavusele suudab savikas materjal siduda arseeni ja vähendada selle liikuvust pinnases.[27] Peale isoleeriva kihi valmimist tuleb rajada selle peale kasvupinnasest koosnev kasvukiht. Isoleerimisest hoolimata reostuse ojja mitteleostumise tagamiseks kaevatakse uuringulõiku nr 4 ojale uus säng, mille kaudu juhitakse vesi ümber reostuskolde nii, et kokkupuude ja võimalus reoainetel ojavette leostuda puudub.

Kuna praegu reostus ohutustatakse ümbritsevast keskkonnast eraldamise teel, jääb reostunud pinnas siiski Kroodi oja lähedusse, küll aga seda mitte enam mõjutades. Tulevikus, kui võimalused ja tehnoloogiad paranevad, on võimalik reostus pinnasest soovi korral eemaldada.

KOKKUVÕTE

Magistritöö käigus uuriti erinevaid võimalusi raskmetallide reostuse ohutustamiseks pinnases. Raskmetallide ohutustamiseks kasutatakse järgnevat meetodeid: vitrifikatsioon, pinnase elektrokineetiline tervendamine, fütoremediatsioon, bioloogiline tervendamine, reostuse isoleerimine või prügilasse ladestamine.

Magistritöö käigus koostatud graafilisest analüüsist selgus, et Kroodi oja orus on kaks reostuskollet, kuhu on tõenäoliselt varasemalt raskmetalliderikkaid tootmisjääke ladustatud. Samuti selgus analüüsist, et reostus on osaliselt kandunud vooluga kaasa. Reostuse levikust parema ülevaate andmiseks koostati ristlõiked, millelt nähtub, et reostus on vertikaalsuunaliselt kihistunud. Samuti selgus ristlõigetelt, et reostus on äärtest osaliselt kaetud puhaste pinnastega, mis tuleneb pidevast oru täitmisest.

Peale graafilist analüüsi valiti Kroodi oja orus viis reostunud pinnalähedast punkti. Nendest kohtadest võeti taimsed proovid, mida uuriti ICP-MS meetodil. Proovikehadeks oli hariliku pilliroo (*phragmites australis*) risoom. Uuritud risoomidest tuvastati raskmetallide sisaldus, mis oli arseeni puhul olenevalt kasvukohast 150-3500 mg/kg KA ning tsingil 330-3100 mg/kg KA. Sellest nähtub, et pilliroo kaudu võib arseen sattuda loomade ja samuti ka inimeste organismi. Seega on vajalik reostus ohutustada. Taimede proovid olid võetud loodusest ja seega suure tõenäosusega oli tegemist ka erineva vanusega taimedega. Pilliroo arseeni ja tsingi akumulereerimisvõimet oleks täpsemalt võimalik hinnata uue katse käigus, kus võetakse näiteks Kroodi oja kaldalt erineva arseeni ja tsingi sisaldusega pinnast ning istutatakse sellesse pinnasesse pilliroo taimed. Taimedest saab sel viisil võtta proovid nii risoomist, vartest kui ka lehtedest. Pilliroo võimekust raskmetalle akumulereerida oleks sel viisil parem hinnata.

Kroodi oja ohutustamiseks otsustati majanduslikul ja keskkonnamõjude analüüsi tulemusel kasutada reostuskolde isoleerimist. Reostuskolde isoleerimine on lihtsaim ja odavaim viis, sest alal on põhjavee kiht sügaval ning reostus on peamiselt säilinud ladestuskohtades. Seega tuleb alamjooksult reostus transportida peamise reostuskolde peale ning katta isoleeriva kihiga.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. „Veekogumite seisundiinfo Keskkonnaagentuuri koduleht“. [veebileht] <http://www.keskkonnaagentuur.ee/et/eesmargid-tegevused/vesi/pinnavesi/veekogumite-seisundiinfo> (15.05.2018).
2. "Lääne-Eesti vesikonna veemajanduskava 2015-2021."
3. Keskkonnaregistri avalik teenus.
4. **I. Valgma**, „Maardu fosforiidileviala tehnogeense põhjavee kvaliteedi uuring“, lk 67.
5. Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ. "Jääkreostusobjektide inventariseerimine 2014-2015 Kroodi oja reostunud põhjasetete reostusuuringu aruanne."
6. „Maardu järv Eesti Entsüklopeedia“. [veebileht] http://entsyklopeedia.ee/artikkel/maardu_j%C3%A4rv1 (10.05.2018).
7. Eesti Keskkonnauuringute Keskus 1998. "Ülevaade Maardu piirkonna pinna- ja kaevandusvee kvaliteedist."
8. Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ. "Jääkreostusobjektide inventariseerimine 2014-2015 Kroodi oja jääkreostuse ohutustamise eelprojekt."
9. Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ. "Analüüsiakt EE18000742" (18.04.2018)
10. Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ. "Jääkreostusobjektide inventariseerimine 2014-2015 Kroodi oja jääkreostuse ohutustamisega kavandatud tegevuste keskkonnamõju hindamise aruanne".
11. „Kemikaalimaailm. Arseen“. [veebileht] <http://kemikaalimaailm.sm.ee/kemikaalid/arseen.html> (27.04.2018)
12. ChemSee, „ChemNote: Arsenic poisoning“. [veebileht] <http://chemsee.com/poison-detection/poison-detection-resources/chemnote-arsenic-poisoning/> (27.04.2018).
13. „Sciencestruck, Arsenic uses“. [veebileht] <https://sciencestruck.com/arsenic-uses> (27.04.2018).
14. **Y. Mamindy-Pajany, C. Hurel, N. Marmier, ja M. Roméo**, „Arsenic adsorption onto hematite and goethite“, *Comptes Rendus Chim.*, kd 12, nr 8, lk 876–881, aug 2009.
15. **J. E. Vidonish, K. Zygourakis, C. A. Masiello, G. Sabadell, ja P. J. J. Alvarez**, „Thermal Treatment of Hydrocarbon-Impacted Soils: A Review of Technology Innovation for Sustainable Remediation“, *Engineering*, kd 2, nr 4, lk 426–437, dets 2016.
16. **B. Park ja Y. Son**, „Ultrasonic and mechanical soil washing processes for the removal of heavy metals from soils“, *Ultrason. Sonochem.*, kd 35, lk 640–645, märts 2017.
17. **L. Liu, W. Li, W. Song, ja M. Guo**, „Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability“, *Sci. Total Environ.*, kd 633, lk 206–219, aug 2018.
18. **M. Kriipsalu, A. Maastik, ja J. Truu**, Jäätmekäitlus ja pinnase tervendamine. Tallinn: TTÜ kirjastus, 2016.

19. **J. Virkutyte, M. Sillanpaa, ja P. Latostenmaa**, „Electrokinetic soil remediation – critical overview“, lk 25, 2002.
20. **H. Ali, E. Khan, ja M. A. Sajad**, „Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications“, *Chemosphere*, kd 91, nr 7, lk 869–881, mai 2013.
21. **S. Khalid, M. Shahid, N. K. Niazi, B. Murtaza, I. Bibi, ja C. Dumat**, „A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils“, *J. Geochem. Explor.*, kd 182, lk 247–268, nov 2017.
22. **M. Esmaeilzadeh, A. Karbassi, ja F. Moattar**, „Heavy metals in sediments and their bioaccumulation in *Phragmites australis* in the Anzali wetland of Iran“, *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, kd 34, nr 4, lk 810–820, juuli 2016.
23. **S. Zhang, J. Bai, W. Wang, L. Huang, G. Zhang, ja D. Wang**, „Heavy metal contents and transfer capacities of *Phragmites australis* and *Suaeda salsa* in the Yellow River Delta, China“, *Phys. Chem. Earth Parts ABC*, kd 104, lk 3–8, apr 2018.
24. **T. Menert**, „Hariliku pilliroo (*Phragmites australis*) biogaasi toorainena kasutamise võimalused“, lk 74.
25. „pilliroog - liigikirjeldus“. [veebileht] <http://bio.edu.ee/taimed/oistaim/proog.htm> (14.05.2018).
26. „Introduction to ICP-MS“. [veebileht] <https://crustal.usgs.gov/laboratories/icpms/intro.html> (15.05.2018).
27. **S. Goldberg**, „Competitive Adsorption of Arsenate and Arsenite on Oxides and Clay Minerals“, *SOIL SCI SOC AM J*, kd 66, lk 9, 2002.

LISAD

Lisa 1. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Kert Kartau,
(sündinud 13.03.1991)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö Kroodi oja jääkreostuse ohutustamine,

mille juhendaja(d) on Urmas Uri ja Erki Kõnd,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja juhendajatele;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 22.05.2018

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

GRAAFILISED LISAD

- 1. Reostusväärtuste visualiseering**
- 2. Ristlõige nr 1**
- 3. Ristlõige nr 2**
- 4. Ristlõige nr 3**
- 5. Ristlõige nr 4**
- 6. Ristlõige nr 5**